

高功率激光多程放大器的三维反演方法

管相合^{1,2}, 张艳丽¹, 张军勇¹, 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对高功率激光多程放大的三维反演问题, 提出了基于修正增益迭代算法结合输入输出积分能量曲线法和基于修正输入脉冲的正向迭代算法。利用这两种方法对有增益分布的四程放大进行数值模拟验证, 计算结果表明这两种迭代算法都是有效可行的, 都可得到输入脉冲时空分离的三维强度分布。计算所得输出脉冲与需求值基本相同, 输出能量的相对偏差小于 10^{-7} , 第一种方法功率波形的相对偏差小于 1%, 第二种方法功率波形的相对偏差小于 10^{-6} , 很好地解决了由放大饱和效应引起的时空演化畸变。第一种方法主要依靠正逆模型的自洽性, 相对直观; 第二种迭代算法引入反馈因子, 所得结果的精度较高、拓展性强。

关键词 激光光学; 多程放大; 波形反演; 增益修正; 输入修正; 三维分布

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0514004

Three-Dimensional Inversion Method for High Power Laser Multi-Pass Amplifier

Guan Xianghe^{1,2}, Zhang Yanli¹, Zhang Junyong¹, Zhu Jianqiang¹

¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aiming at the three-dimensional inversion problem of high power laser multi-pass amplification, we propose two inversion methods. The first method is a modified gain iterative algorithm based on the curve fitting method of input-output integral energy. The second method is a forward iterative algorithm based on the modified input pulse. In the four-pass amplification with gain distribution, the two methods are verified by numerical simulation. The results show that the two iterative algorithms are effective and feasible, and the three-dimensional intensity distribution of spatio-temporal separation of input pulse can be obtained. The calculated output pulse is basically the same as the demanded value. The relative deviation of the output energy is less than 10^{-7} . The relative deviation of the power waveform obtained by the first method is less than 1%, and this value is less than 10^{-6} for the second method. The spatio-temporal evolution distortion caused by the saturation effect is solved. The first method relies mainly on the consistency of the forward and inverse model, which is relatively straightforward. The second iterative algorithm introduces a feedback factor, and has high precision and strong expansibility.

Key words laser optics; multi-pass amplification; waveform inversion; gain correction; input correction; three-dimensional distribution

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 190.2620; 160.4330

1 引 言

惯性约束核聚变和高能物理实验对高功率激光

装置的输出性能指标有着极为严格的要求, 高功率激光装置中光学元件种类多、数量大, 系统极为复杂, 其中任意一个元件或子系统参数的改变都有可

收稿日期: 2017-11-14; 收到修改稿日期: 2017-12-22

基金项目: 国家国际科技合作专项(2010DFB70490)

作者简介: 管相合(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光放大系统的能量传输和优化设计方面的研究。

E-mail: guanxianghe@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 博士, 研究员, 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@siom.shcnc.ac.cn(通信联系人)

能导致输出性能与目标要求发生较大偏离^[1-2],因此为了确保每一路光束、每个输出脉冲都满足既定要求,必须制定一套能准确确定输入条件的措施,以支持装置的高水平运行。美国国家点火装置(NIF)已经实现能量为 1.8 MJ、功率为 500 TW 的 3 倍频光输出,是现今已建成的输出能量最高的激光驱动器^[3]。为了实现 192 路光束的高性能输出,NIF 开发了激光性能运行模型(LPOM)^[4],以指导整个装置精确运行。LPOM 应用推测与修正的思想实现对理想脉冲的逆向反演,但是报道中并没有给出详细的算法过程。在国内,Lü 等^[5]对单程激光放大的逆问题进行了详细求解,但在对多程放大过程的求解中^[6],其模型相对较为复杂。张彬等^[7]利用空间反转补偿模型求解逆问题,得到了较好的空间补偿注入分布,但未见其报道脉冲波形的三维综合分布。以往关于高能激光脉冲波形反演的研究已经对时间波形的反演^[8-10]和空间分布为平面波的脉冲反演^[11-12]进行了充分的研究,但并未涉及到输入脉冲的三维时空分布。某些文献虽然通过迭代方法得到了输入脉冲的时空分布,但是其时间分布与空间分布不能分离,而实际应用中的高功率放大器大多工作在深度饱和状态,不得不考虑时空演化畸变^[13]。因此,有必要对如何得到时空分布可分离的输入脉冲进行研究,以得到较为接近实际的注入分布。

以上述问题作为出发点,本文提出了两种可得到时空分离的输入脉冲的反演方法。第一种方法以增益修正为基础,将空间增益修正法和输入输出积分能量曲线拟合法^[13]相结合,分别对输入脉冲的空间分布和时间波形进行反演计算。第二种方法以输入修正为基础,通过输出波形与理想波形的对比,不断对输入波形进行修改,最终得到符合要求的输入波形。计算结果表明,这两种方法都可得到输入脉冲的三维时空分布,并且可对任意的空间分布和时间波形的输出脉冲进行反演。

2 基于增益修正的迭代结合输入输出通量曲线方法

空间增益修正是指在薄片损耗近似下,根据脉冲序列模型和薄片损耗模型,通过反复计算正逆放大过程实现注入光束的求解。假设理想输出脉冲的需求功率分布和能量密度空间分布分别为 $P_{out}(t)$ 和 $F(x, y)$,将脉冲进行序列分割,设网格化的强度分布为 $I_{out}(m, n, j)$, m, n, j 分别表示 x, y, t 的序列位置,

采样个数分别为 M, N, J ,采样间距分别为 D_x, D_y, D_t ,其瞬时能量密度时空分布 $E_{out}(m, n, j) = I_{out}(m, n, j) \times D_t$ 。假设多程放大中,第 i 程放大的初始增益系数为 G_i ,将放大介质进行切片,空间切片个数为 Q ,则网格化的增益系数为 $G_i(m, n, q)$,其中 q 表示放大介质内切片的空间序列位置,放大器初始小信号增益为 $G_0(m, n)$ 。以四程放大为例,空间增益修正法的计算步骤如下。

1) 假设第 1 次迭代时,四程所有空间切片的初始小信号增益 G_1, G_2, G_3, G_4 都为 G_0 。将理想输出脉冲 E_{out} 代入 F-N 方程的逆向公式:

$$E_{in} = E_s \ln\{1 - \{1 - \exp[E_{out}/(TE_s)]\}/G_{in}\}, \quad (1)$$

式中: E_s 为饱和能量密度; T 为介质的损耗因子。利用(1)式得到第一个时间切片的输入脉冲能量密度,然后应用增益公式计算第一个时间切片的剩余增益 G_{out} :

$$G_{out} = G_{in} \exp(E_{in}/E_s) / \{1 + G_{in}[\exp(E_{in}/E_s) - 1]\}, \quad (2)$$

式中 G_{in} 为第二个时间切片的初始增益。依次类推,利用(1)、(2)式求出第四程放大输入脉冲能量密度的三维分布 E_{in} ,计算所得的 E_{in} 也是下一程反演计算的输出脉冲,重复上述过程直至遍历完四程所有的空间切片,得到最终的输入脉冲 E_{inc} 。

2) 将步骤 1) 中得到的 E_{inc} 代入到正向放大过程中,第一程所有空间切片的起始小信号增益 $G_1 = G_0$,与步骤 1) 类似,首先应用 F-N 方程的正向公式

$$E'_{out} = TE_s \ln\{G_{in}[\exp(E_{in}/E_s) - 1] + 1\}, \quad (3)$$

计算 q 空间切片中第一个时间切片的输出脉冲能量密度,然后应用(2)式计算得到第二个时间切片的初始增益 G_{in} ,反复应用(2)、(3)式得到所有时间切片的输出能量密度和第一程放大的剩余增益 G'_1 ,此增益也对应着此处第二程放大的初始小信号增益 G_2 ,此处需要注意不同程数间的空间对应关系。遍历四程放大的空间切片,最终得到预测输出脉冲 E'_{out} 和各程的小信号增益 G_2, G_3 和 G_4 。

3) 当预测脉冲的功率波形 P 与理想脉冲的功率波形 P_0 的关系满足

$$|(P - P_0)/P_0|_{\max} \leq 10^{-6}, \quad (4)$$

则 E_{inc} 即为所求结果,否则利用步骤 2) 得到的各程小信号增益系数,重复步骤 1)、2) 进行迭代计算,直至满足判断条件。

假设片状放大器共有 11 片放大介质,每片放大

介质的厚度 $L = 4 \text{ cm}$, 其口径大小为 $39 \text{ cm} \times 39 \text{ cm}$, 空间采样点数为 121×121 , 光束中心设为坐标原点。经过四程放大, 要求得到沿 z 方向传输的能量为 15 kJ 的 6 阶超高斯分布的输出脉冲, 且其在 xy 平面上的能量密度空间分布为 11 阶超高斯分布, 光束半径 $R = 18.5 \text{ cm}$ (峰值强度的 1% 处), 时间切片数为 50。模拟计算中, 假设所采用的初始小信号增益系数为圆对称分布, 其表达式为 $g_0 = 0.05(1 - 0.0005r^2)$, r 为放大介质上的点与中心点的距离, $E_s = 4.7 \text{ J/cm}^2$, 放大器动态吸收系数 $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$ 。

首先应用空间增益修正法, 经过 20 次迭代计算后满足判断条件, 得到 E_{inc} 。此时得到的输入脉冲在每一时刻上的空间分布是不同的, 但是在实际过程中无法对输入脉冲每一时刻的强度分布进行调节, 所以需要 E_{inc} 在时空分布上进行一定的修改。因为脉冲放大的功率增益与入射脉冲通量有关而与入射脉冲的波形无关, 所以可以将 E_{inc} 在时间 t 上进行求和, 得到预测脉冲的两维通量密度分布 F_{in} 。每一空间点给定一个相同的时间波形, 结合 F_{in} 构造出新的输入脉冲 E'_{in} 。将 E'_{in} 代入正向放大计算中求得 E'_{out} , 利用输入输出积分能量曲线法^[13], 即可得到目标输出脉冲所对应的输入脉冲的时间波形 P_{in} 。通过上述过程, 即可得到满足输出要求的时空分布可分离的输入脉冲, 其归一化强度分布如图 1 所示, 三维强度分布如图 2 所示, 注入能量为 9.13 J 。

由图 1 可知, 通过此方法求得的输入脉冲在不同空间位置处的波形分布是相同的, 其不同时刻的强度分布也是相同的, 因此在工程上可以较为简单地得到此种脉冲。图 1(b) 显示了输入脉冲不同时刻的一维强度空间分布形状 (类似凹槽分布), 图中极大值与中心点极小值的相对比值为 2.2, 放大介质中对应位置的小信号增益系数的绝对差值为 0.0381 cm^{-1} 。

将最终得到的输入脉冲代入正向计算过程, 得到预测输出脉冲, 其相对能量偏差为 6.5×10^{-8} 。预测脉冲不同坐标点的时间分布如图 3(a) 所示, 由于增益的不同, 中心区域的脉冲后沿低于脉冲前沿, 而脉冲边缘区域的脉冲后沿高于脉冲前沿, 从而补偿了中心区域的波形畸变, 得到满足要求的输出脉冲功率波形。图 3(b) 为预测脉冲不同时刻的一维空间分布图。图 4 为预测脉冲与理想脉冲的归一化功率波形对比图以及归一化一维通量密度分布的对比图。图 5 为输出脉冲功率波形的

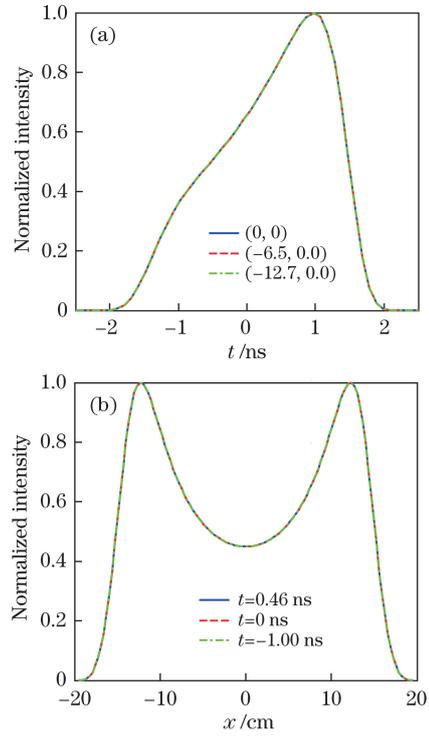


图 1 输入脉冲归一化强度的时空分布 (方法 1)。
(a) 不同坐标点的时间波形; (b) 不同时刻的一维空间分布
Fig. 1 Spatial and temporal distributions of normalized intensity of input pulse (method one).
(a) Time waveforms at different coordinate points;
(b) one-dimensional spatial distribution at different time

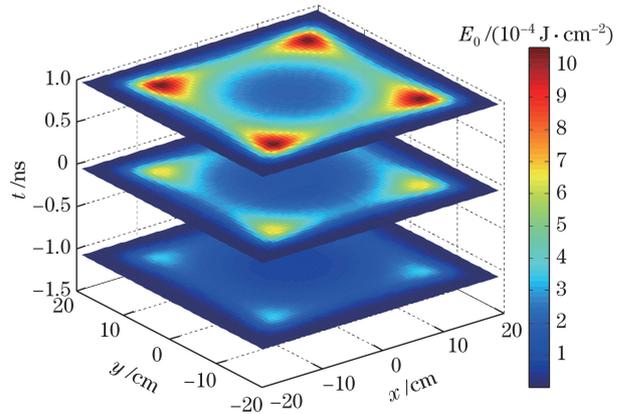


图 2 输入脉冲的三维强度分布 (方法 1)
Fig. 2 Three-dimensional intensity distribution of input pulse (method one)

相对偏差, 其最大值小于 0.7% 。用平均相对功率偏差 $\sqrt{\sum_{i=1}^J [(P_i - P_{oi})/P_{oi}]^2 / J}$ 来描述预测精度, J 为时间切片数, P_i 和 P_{oi} 分别为预测和理想波形的瞬时功率, 可得平均相对功率偏差为 0.26% 。从图 5 中可以看出, 虽然预测脉冲不同坐标点的时间波形和不同时刻的一维空间分布都不相同, 但预测

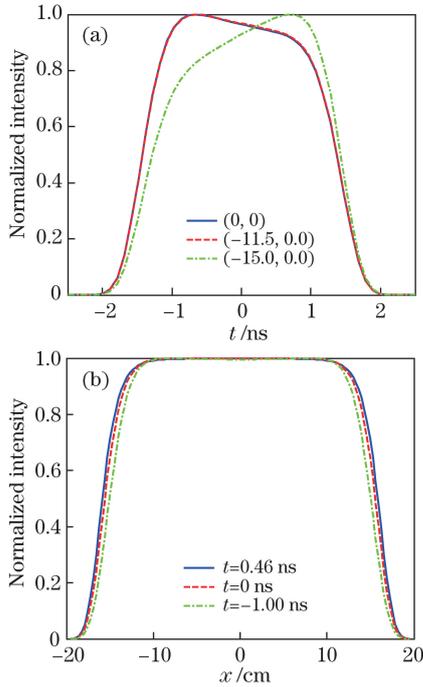


图3 输出脉冲归一化强度的时空分布(方法1)。
(a)不同坐标点的时间波形;(b)不同时刻的一维空间分布

Fig. 3 Spatial and temporal distributions of normalized intensity of output pulse (method one).

(a) Time waveforms at different coordinate points;
(b) one-dimensional spatial distribution at different time

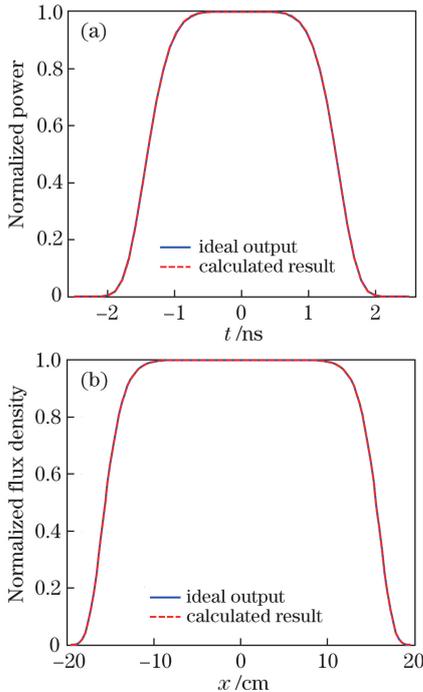


图4 输出脉冲的(a)归一化功率波形和
(b)归一化一维通量密度分布(方法1)

Fig. 4 Distributions of (a) normalized power waveforms and
(b) normalized one-dimensional flux density of
output pulse (method one)

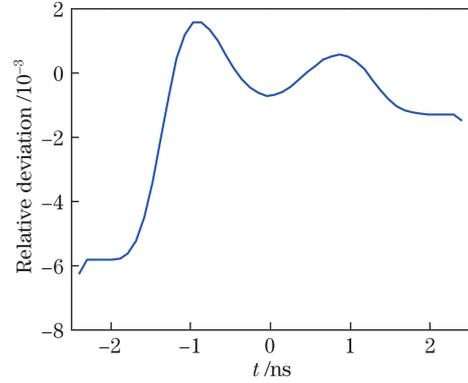


图5 输出脉冲相对偏差(方法1)

Fig. 5 Relative deviation of output pulse (method one)

脉冲的功率波形(同时刻的空间积分)和通量密度分布(同空间位置的时间积分)与理想脉冲完全重合。

3 基于输入修正的正向迭代方法

通过正向迭代法求输入脉冲,首先要给出一个时空分布任意的初始输入脉冲,将初始输入脉冲代入正向放大计算式中,得到预测脉冲,利用预测脉冲与理想脉冲的差别对输入脉冲进行修正,经过迭代,最终得到满足要求的输入脉冲。正向迭代法的具体计算步骤如下:

1) 给定输入脉冲 E_{in} ,根据放大器的放大能力设定输入脉冲的初始能量近似值。 E_{in} 的时空分布可任意选取,但为了缩短计算时间,其时空分布一般与理想脉冲的 E_{out} 相同。

2) 将 E_{in} 代入正向放大过程,与方法1中的步骤2)相同,反复利用(2)、(3)式,求出预测脉冲 E'_{out} 。

3) 求出 E_{in} 与 E'_{out} 功率波形的比值(即一维数组 \mathbf{K}_i)和通量密度的比值(即二维数组 \mathbf{K}_{xy}),二者可分别表示为

$$\mathbf{K}_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{ii}, \dots, k_{iJ}), \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{xy} = \begin{pmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,M} \\ \vdots & & \vdots \\ k_{N,1} & \dots & k_{N,M} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中 M, N 表示空间取点数。按(5)式将 \mathbf{K}_i 和 \mathbf{K}_{xy} 构造成三维数组 \mathbf{K}_{xyi} :

$$\mathbf{K}_{xyi} = (\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_i, \dots, \mathbf{K}_J), \quad (7)$$

式中 $\mathbf{K}_i = k_{ii} \mathbf{K}_{xy}$ 。将 \mathbf{K}_{xyi} 与 E_{in} 相乘,得到一个全新的时空分布 E_{in} 。

4) 当 E_{out} 和 E'_{out} 满足判断条件[(4)式]时, E_{in} 即为所求结果,否则重复步骤2)、3)进行迭代计算,直至满足判断条件。

基于输入修正的迭代方法与基于增益修正的迭

代方法的计算条件相同,经过 40 次迭代计算后满足判断条件,得到的输入脉冲能量为 9.13 J,归一化时空分布如图 6 所示。输入脉冲在不同坐标点的时间波形与不同时刻的一维空间分布几乎重合。图 6(b) 为输入脉冲在不同时刻的一维空间分布,与图 1(b) 相同,其极大值和中心极小值的相对差值也为 2.2,放大介质中对应位置的小信号增益系数的绝对差值为 0.0381cm^{-1} 。图 7 为输入脉冲的三维强度分布。

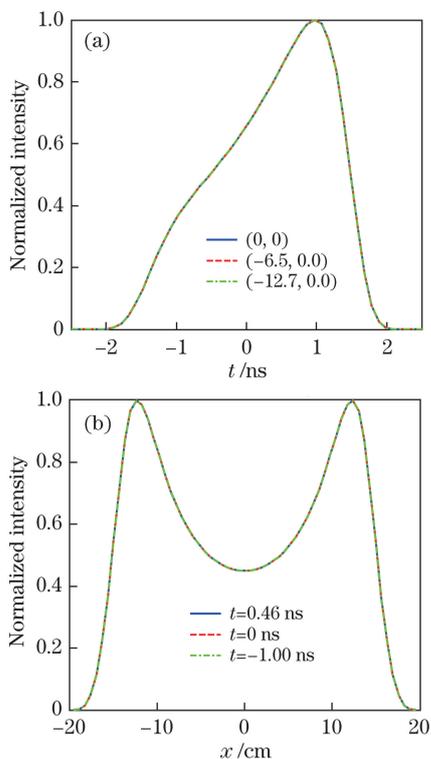


图 6 输入脉冲归一化强度的时空分布(方法 2)。
(a)不同坐标点的时间波形;(b)不同时刻的一维空间分布
Fig. 6 Spatial and temporal distributions of normalized intensity of input pulse (method two).
(a) Time waveforms at different coordinate points;
(b) one-dimensional spatial distribution at different time

将此种方法求得的输入脉冲代入正向计算式,得到预测输出脉冲,其相对能量偏差为 1×10^{-8} 。图 8 为预测输出脉冲在不同坐标点的时间分布图和不同时刻的一维空间分布图。图 9 为输出脉冲与理想脉冲的归一化功率波形对比图以及归一化一维通量密度分布的对比图。由图 8、9 可以看出,该方法所得的结论与第一种方法相同。图 10 对应的是输出脉冲功率波形的相对偏差,其最大值小于 8×10^{-7} 。从波形偏差图中可以发现,正向迭代法求得的输出脉冲其功率波形的偏差主要来源于脉冲前后沿能量较小的部分。正向迭代方法的平均相对功率偏差为 7.55×10^{-6} 。综上可以得出:第一种方法

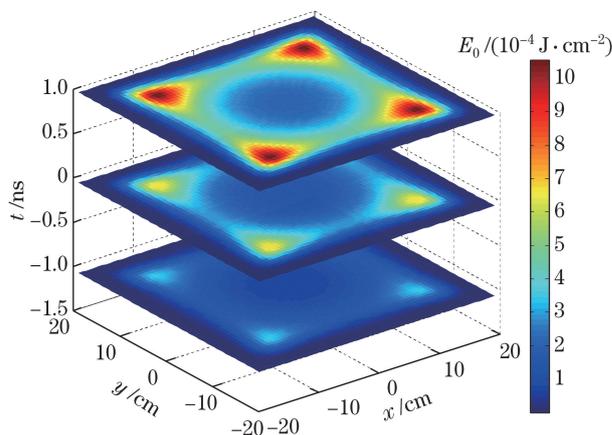


图 7 输入脉冲的三维强度分布(方法 2)
Fig. 7 Three-dimensional intensity distribution of input pulse (method two)

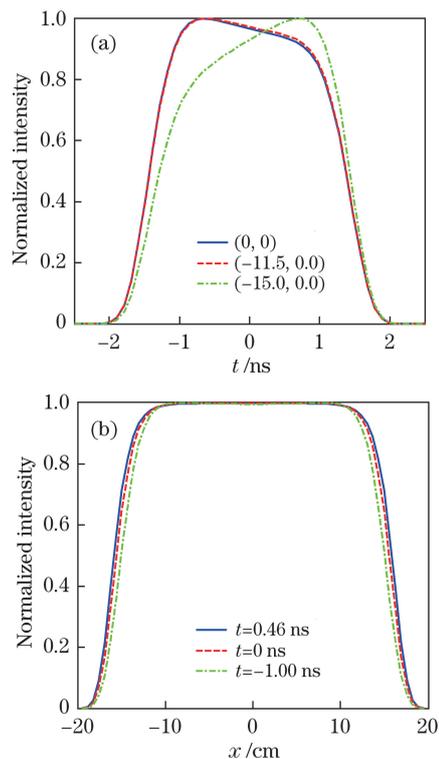


图 8 输出脉冲归一化强度的时空分布(方法 2)。
(a)不同坐标点的时间波形;(b)不同时刻的一维空间分布
Fig. 8 Spatial and temporal distributions of normalized intensity of output pulse (method two).
(a) Time waveforms at different coordinate points;
(b) one-dimensional spatial distribution at different time

中,一次迭代计算进行了正向和逆向两个流程的计算,且最后还要结合输入输出曲线进行波形计算,总的计算时间比第二种方法长。此外,正向迭代法的反演精度也比第一种方法高。需要指出的是,此方法的迭代思想可扩展到宽带放大的反演计算中,通过引入合适的反馈因子,即可实现输入脉冲的预设置。

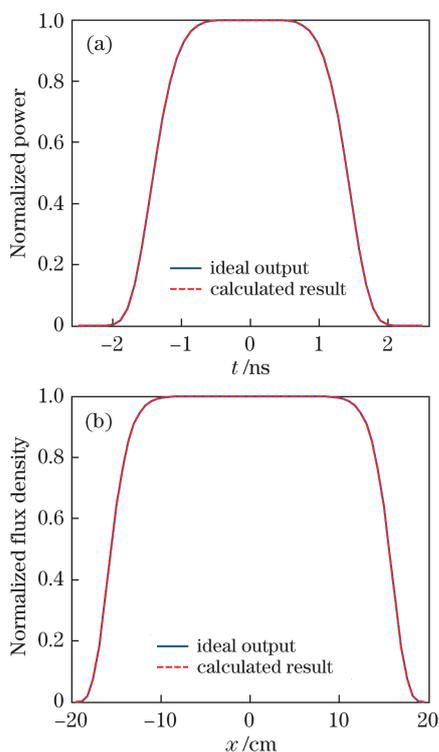


图 9 输出脉冲的(a)归一化功率波形和
(b)归一化一维通量密度分布(方法 2)

Fig. 9 Distributions of (a) normalized power waveforms and
(b) normalized one-dimensional flux density of
output pulse (method two)

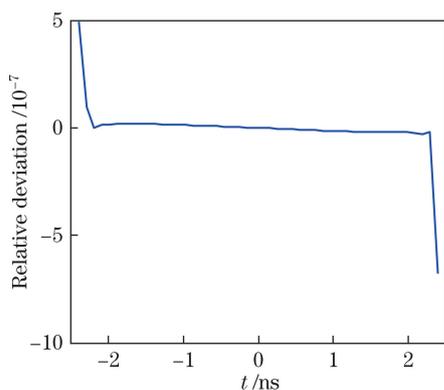


图 10 输出脉冲相对偏差(方法 2)

Fig. 10 Relative deviation of output pulse (method two)

4 结 论

系统介绍了基于空间增益修正和基于输入修正这两种反演计算求输入脉冲的方法。相较于之前求输入脉冲的方法,这两种方法均可得到输入脉冲的三维分布,并且所得输入脉冲在不同坐标点的时间波形和不同时刻的一维空间分布都相同,减小了实际工程中实现输入脉冲的难度。这两种方法得到的预测脉冲的功率波形和一维通量密度分布与理想脉

冲基本重合,均解决了在放大器的增益空间分布不均匀时输入脉冲的三维反演问题。值得指出的是,应用第一种方法对单程放大反演求解时无需进行迭代计算,有一定优势。对于解决多程中的放大反演问题,第二种方法的计算过程比第一种方法简单,计算结果的精度更高,将第二种方法的迭代思想扩展到宽带放大的反演计算中,其中迭代修正注入脉冲时利用了比值反馈因子,还可以利用差值反馈因子实现对注入脉冲的修正,同时考虑注入能量的修正。所提方法对高功率激光系统的数字化运行控制具有重要的意义,可用于指导装置的光束空间和功率平衡控制。

参 考 文 献

- [1] Peng J Q, Hu X C, Chen L X, *et al.* Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0514001.
彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0514001.
- [2] Ren L, Zhao D F, Zhu J Q. Advances in target and beam alignment unit technologies of high power laser drives[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 080001.
任磊, 赵东峰, 朱健强. 高功率激光驱动器靶定位瞄准单元技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 080001.
- [3] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, *et al.* Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [4] Shaw M, House R. Laser performance operations model (LPOM): the computational system that automates the setup and performance analysis of the National Ignition Facility[C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9345: 93450E.
- [5] Lü B D, Zhang B. The inverse problem of a laser amplifier[J]. *Optics Communications*, 1996, 130: 279-282.
- [6] Wang W Y, Geng Y C, Chen L, *et al.* Influence of the 400 mm-aperture Nd:glass slab-amplifier gain nonuniformity on 1ω (1053 nm) near-field performance[C]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8904: 89041E.
- [7] Zhang B, Lü B D. An inverse problem of multistage and multipass pulsed-laser amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(6): 495-500.
张彬, 吕百达. 多级和多程脉冲激光放大器的逆问题[J]. *中国激光*, 1997, 24(6): 495-500.

- [8] Tang L J, Cai X J, Lin Z Q. Control of pulse shape in “Shen Guang II” main amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(6): 1075-1079.
唐立家, 蔡希洁, 林尊琪. “神光 II”主放大器中的波形控制[J]. 物理学报, 2001, 50(6): 1075-1079.
- [9] Liu R H, Cai X J, Yang L, *et al.* Study on gain fluence curve of a laser pulse amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(7): 3140-3143.
刘仁红, 蔡希洁, 杨琳, 等. 激光脉冲放大器的增益通量曲线研究[J]. 物理学报, 2005, 54(7): 3140-3143.
- [10] Liu R H, Cai X J, Yang L, *et al.* Numerical simulation of output pulse shape for “Shengguang II”[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(12): 4189-4193.
刘仁红, 蔡希洁, 杨琳, 等. “神光 II”装置激光输出波形的数值模拟[J]. 物理学报, 2004, 53(12): 4189-4193.
- [11] Wang W Y, Zhao R C, Su J Q, *et al.* High-power solid-state laser performance simulation model[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s1): 23-27.
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 高功率固体激光性能仿真模型[J]. 光学学报, 2008, 28(s1): 23-27.
- [12] Zhang J Y, Zhang Y L, Ma W X, *et al.* High-precision inversion method of pulse shape at SGII facility[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0414004.
张军勇, 张艳丽, 马伟新, 等. 神光 II 全链路脉冲波形的高精度反演[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414004.
- [13] Zhang Y L, Zhang J Y, You K W, *et al.* Fast shape prediction in multi-pass amplifier of high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0714001.
张艳丽, 张军勇, 尤科伟, 等. 高功率激光多程放大系统中的快速波形预测[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0714001.