

多程脉冲激光放大器的宽带放大逆问题研究

张军勇¹ 张艳丽¹ 马伟新² 朱 俭² 刘德安¹ 朱健强¹ 林尊琪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联合实验室, 上海 201800)
² 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 宽带放大逆问题对于研究高功率激光系统的放大性能十分重要。将极化强度时域解析法应用于亚纳秒量级的宽带放大研究,通过 Gerchberg-Saxton(GS)和遗传算法的混合算法,详细模拟和研究了脉冲激光的宽带放大逆问题,即给定输出脉冲的时间和空间分布,结合放大系统参数,逆向反演注入放大器脉冲的时空波形。极化强度时域解析法应用于宽带放大具有计算耗时少的优点,混合智能算法简化了激光放大器的逆问题模型,加快了逆问题求解的收敛速度。

关键词 激光光学;宽带放大;逆问题;混合智能算法;极化强度时域解析法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1214003

Research on Inverse Problem of Broadband Amplification in Multi-Pass Pulsed-Laser Amplifier

Zhang Junyong¹ Zhang Yanli¹ Ma Weixin² Zhu Jian²

Liu De'an¹ Zhu Jianqiang¹ Lin Zunqi¹

(¹ National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

Abstract The inverse problem of broadband amplification is very important in research on the properties of laser amplifier. Analytic electric polarization in the temporal domain is applied to broadband amplification in the sub-nanosecond time scale. The inverse problem of broadband amplification is studied and simulated numerically in detail by use of genetic algorithm and Gerchberg-Saxton (GS) algorithm, namely, to solve the input pulsed-laser spatial and temporal shape from the given output pulsed-laser and laser amplifier parameters. On one hand, analytic electric polarization in the temporal domain is more effective to solve broadband amplification, on the other hand hybrid intelligent algorithm greatly simplifies the inverse-problem modeling of broadband amplification, and accelerates the convergence of the solution to inverse problem.

Key words laser optics; broadband amplification; inverse problem; hybrid intelligent algorithm; analytic electric polarization in the temporal domain

OCIS codes 100.3190; 140.3280; 40.3580; 190.5530; 200.4260

1 引 言

在高功率激光装置系统中,数字化运行控制模块(LPOM)已成功应用于模拟仿真和控制、反馈和调整整个激光光路^[1~6]。以美国 NIF 为例,科研人员于 2001 年着手研发这一关键技术,于 2004 年 10 月首次调试运行,2005 年实现 NIF 装置的 8 路激光

自动调整,之后成功实现 192 束激光束的稳定输出与束间精密平衡控制。LPOM 目前已成功发展成为新一代聚变级激光装置稳定运行及束间能量和功率平衡的核心平台。神光 II 作为我国第一台有能力输出二倍频三倍频以实施靶物理实验的高水平运行实验装置^[7],其升级装置于 2011 年 7 月已成功开

收稿日期: 2012-06-21; 收到修改稿日期: 2012-08-14

基金项目: 中国科学院资助项目(GY-110501)和国家自然科学基金(11104296)资助课题。

作者简介: 张军勇(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事纳米光学和激光传输方面的研究。

E-mail: zhangjin829@163.com

展终端靶场第二阶段验证实验。

放大器作为大型激光装置中的一个关键组成部分,它决定了激光系统最终能量的输出能力。打靶或物理实验对放大器的输出脉冲激光波形具有特定的要求,为了有效抑制大口径光学元件的横向非弹性散射,以及降低激光束的近场空间相干性,提高光束空间均匀性,可以引入相位调制模块实现单纵模激光的频谱展宽。通过展宽后的光束辅助谱色散匀滑(SSD)技术能够明显改善激光脉冲对靶丸的辐照均匀性,提高系统的安全运行通量、打靶质量和成功率。但是宽带光在脉冲激光放大器的传输过程不可避免地会因电场的相位调制最终演化成幅度调制,即幅频(FM-AM)效应,这种效应导致原本匀滑的脉冲激光在时间域波形上出现尖峰振荡,这一结果的出现极大影响了脉冲激光的整形能力,同时也大大降低了系统的安全运行能量。而上述问题的逆问题是,给定输出脉冲激光的波形,结合放大器参数,求解出输入脉冲的时间和空间分布,以及相应的初始注入能量。逆问题的研究是对正向放大传输的反向演绎,其意义在于通过正向实验数据与反向模拟计算的对比,发现系统对理想条件的偏离,从而做出修正与改进,以期实现既定输出。

与 Prop92 及 Fresnel 软件相比较,Miro 软件一大亮点是嵌入了脉冲激光的宽带放大设计和分析,其算法通过短时傅里叶变换实现^[6,8]。该算法可以实现相位调制脉冲激光的宽带放大理论分析,文献[9]在 SG-II 前端低温再生放大器设计和分析中也

采用了短时傅里叶变换方法。值得一提的是,1993年 Chuang 等^[10]在解决啁啾脉冲激光放大过程中通过极化强度的时域解析法同样实现了非平稳信号的数值分析。短时傅里叶变换的缺点在于算法过程中要对数据进行升维和降维处理,这必然增加计算时间,工程时效性差。相比之下,极化强度时域解析法更显得耗时少、精度高、工程时效性强,且在数十皮秒至纳秒量级可以安全使用。本文将充分利用极化强度时域解析法的高效性、智能算法的全局搜索和并行优化等特性,以期实现统一算法流程解决宽带放大逆问题。遗传算法是建立在自然选择和遗传机理基础上的自适应概率性搜索算法,具有全局优化、鲁棒性和并行性等特点,而自适应 Gerchberg-Saxton(GS)算法在局域搜索方面迭代快速收敛,恰恰弥补了遗传算法在局域搜索方面的不足^[12,13]。此外,混合智能算法对于频率转换逆问题分析、放大器参数的优化设计,以及全激光链路的多参数优化也具有较强的通用性和适应性。

2 脉冲激光的宽带放大逆问题模型及算法

Frantz-Nodvik 模型^[13,14]能够较好地解决脉宽为纳秒/亚纳秒量级的脉冲激光放大器的传输放大问题,这也是 Fresnel 软件中放大分析的主要模型。而法国 Miro 软件嵌入了宽带放大分析,其相应的均匀加宽增益的脉冲激光宽带放大方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial E(z,t)}{\partial z} = i\tilde{P}(z,t) \\ \frac{\partial \tilde{P}(z,t)}{\partial t} = i(\omega_A - \omega_L)\tilde{P}(z,t) - \frac{\tilde{P}(z,t)}{T_2} - i\frac{g(z,t)}{T_2}E(z,t), \\ \frac{\partial g(z,t)}{\partial t} = -g(z,t)\frac{|E(z,t)|^2}{F_{\text{sat}}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\tilde{P} = P\omega_L/(2nc)$, P 为电场极化强度, n 为增益介质折射率, c 为真空中光速, E 为电场分布, ω_A 为增益介质发射谱的中心频率, ω_L 为脉冲激光中心频率, $T_2 = 2/\Delta\omega_A$ 为增益介质的退相时间, g 为光信号增益系数, F_{sat} 为增益介质的饱和能流密度。参考 Chuang 方法^[10],可以得到极化强度的时域解析式为

$$P(z,t) = \frac{-igE}{1 + iT_2[\phi'_m(t) + \omega_L - \omega_A]}, \quad (2)$$

式中 $\phi'_m(t)$ 为电场相位部分对时间的微分。

遗传算法的流程如下:给定的电场 $\bar{I}(x,y,t)$ 具

有三维分布形式,可以离散成一个 $m \times n \times p$ 的三维数组。而放大器参数既定的情况下,任意一个输入电场经过激光放大器后的输出记作 $I(x,y,t)$ 。宽带放大逆问题混合智能算法流程具体如图 1 所示,具体程序的实现步骤如下:

1) 初始种群。根据问题空间的解,通过 GS 算法逆向求得一个初始电场分布,并与随机生成一定数目的初始染色体(即电场)集合,形成初始种群,每一个染色体由 $m \times n \times p$ 个基因构成。

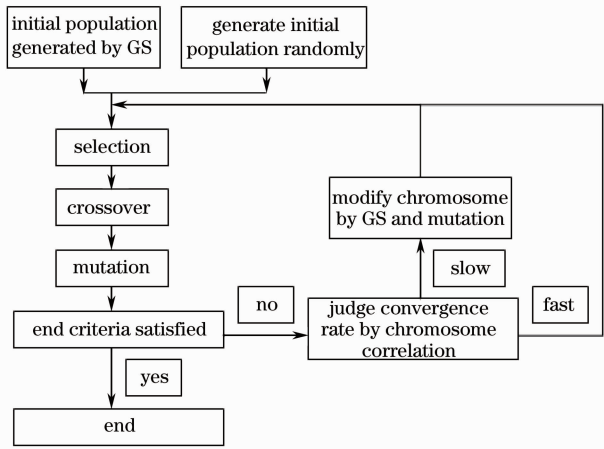


图1 混合智能算法流程

Fig. 1 Flow chart of hybrid intelligent algorithm

2) 选择。按照(3)式计算每个染色体的适应度函数值,采用轮盘赌选择,同时采取保优策略。很明显,适应度函数值越大的染色体,被选择的概率也越高。

$$f_{\text{fitness}} = \sqrt{\frac{\sum [I(x, y, t)]^2}{\sum [I(x, y, t) - \bar{I}(x, y, t)]^2}} \quad (3)$$

3) 交叉。染色体按照其适应度函数降序排列的模式分组,如果染色体数目是奇数,可以合并保优染色体构成偶数。参考交叉概率,随机选择对称位置的染色体的两点之间的基因执行算术交叉[(4)式]。而交叉操作完成后可以任意删除一个染色体,以保持原种群数目不变。

$$\begin{cases} E_1^* = \alpha E_1 + (1 - \alpha) E_2 \\ E_2^* = \alpha E_2 + (1 - \alpha) E_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 E_1 、 E_2 分别代表当前进化代中的任意两个电场分布,随机数 $\alpha \in [0, 1]$ 。

4) 变异。参考变异概率,随机选择染色体的两点之间的基因执行变异,变异的基因仍归属于问题空间。

5) 计算新的种群是否满足判据,若是,则终止进化。反之,判断进化的收敛速度,如果前后两次种群的收敛速度之差的绝对值小于给定的一个阈值,则需要对染色体进行 GS 算法和变异操作,之后重复步骤 2)~4), 这样可以实现加快收敛,更快地寻找到最优解。

3 幅频效应的宽带放大逆问题的数值计算

计算参数参考文献[8],增益介质带宽取值 20 nm,发射谱中心波长 1053 nm,饱和能流密度近

似 4.93 J/cm^2 ,增益系数 3 dB/m,等效片厚 144 cm,期望输出的脉冲激光为径向对称光束,电场振幅的平顶空间分布引入一个参数为 0.4 的 Tukey 窗口,脉冲强度半峰全宽(FWHM)为 231.13 mm,最大能量密度为 1.6 J/cm^2 ,光束口径为 $310 \text{ cm} \times 310 \text{ cm}$,脉冲激光持续时间为 80 ps,正弦相位调制深度为 10 rad,调制频率为 170 GHz。

时间域上输出的正弦相位调制的期望电场可以表示为

$$E(z, t) = E_1(z, t) \exp[i\sigma \sin(2\pi f_m t)] = E_1(z, t) \exp[i\phi_m(t)], \quad (3)$$

式中 E_1 为入射电场的振幅, σ 为电场的相位调制深度, f_m 为电场的相位调制频率。

通过极化强度时域解析法和混合智能算法求解宽带放大逆问题,该算法经过 30 次迭代可以满足电场 10^{-3} (相对于期望输出电场的峰值)的计算精度,此时的输入脉冲的能量密度为 898.4231 J/m^2 ,相应的输入电场的时空强度归一化分布如图 2 所示,所有纵坐标相对于期望输出电场的峰值作归一化处理。从图 2(a)中可以看出,电场在径向近似均匀放大,脉冲 FWHM 为 231.1333 mm。FM-AM 效应使得光强度在时间轴上的调制频率为初始调制频率的两倍。另外,期望电场的能量密度远偏离饱和能量密度,空间畸变不明显,如图 2(b)所示。图 2(c)说明,因为脉冲前沿通过放大介质时消耗的反转粒子数多于后沿,所以脉冲前沿的放大能力大于后沿,使得脉冲波形前沿变陡更快而后沿较慢。包络轮廓上类似于长脉冲激光放大的时间波形分布,故而脉冲时间波形上应该前低后高。计算表明,随着注入能量密度越大,增益饱和和效应越明显,脉冲波形畸变越大。另外,逆向反演得到的初始脉冲在时间轴上存在强度调制,是因为传输放大的正逆问题是反演对称的,其振幅调制和相位调制也互为演化。

为了检验该算法在宽带放大逆问题中的计算精度和准确度,将逆向反演的注入脉冲作为宽带放大器的输入条件,如果该算法精准可靠,那么此时的输出脉冲激光理论上应该和期望电场完全重合。实际计算的输出脉冲能量密度为 1.5999 J/cm^2 ,与期望脉冲 1.6 J/cm^2 的偏差为 0.00625%,它充分说明了混合智能算法在宽带放大逆问题中的精准、高效。计算的期望电场如图 3 所示,所有纵坐标对期望电场的峰值归一化。计算的期望电场的空间分布满足参数为 0.4 的 Tukey 窗口,FWHM 为 231.1273 mm,如图 3(b)所示。另外由于相位调制发生在时间域上,因而对于

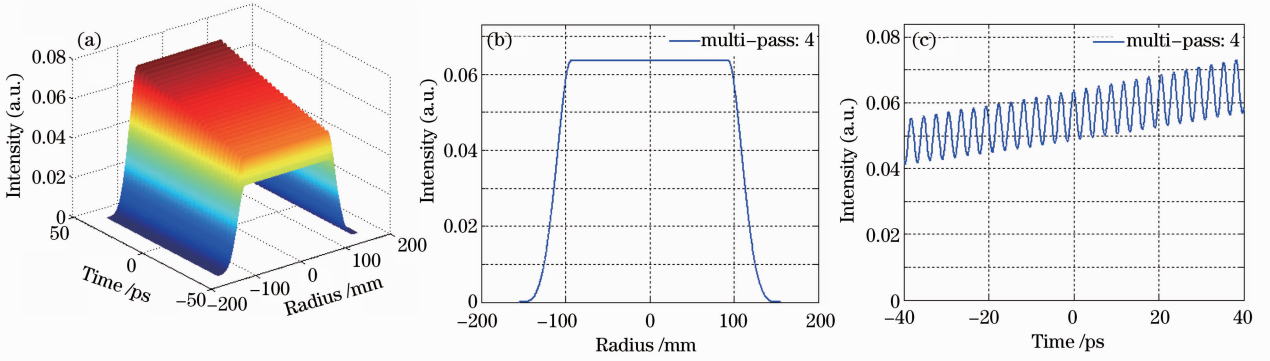


图 2 逆向反演的输入电场归一化光强分布(相对期望电场)。(a)二维光强分布；(b)沿径向的光强分布；(c)时间波形
Fig. 2 Normalized input intensity distribution based on inverse problem of broadband amplification (relative to expected field). (a) 2D intensity distribution; (b) intensity distribution along radial direction; (c) temporal shape

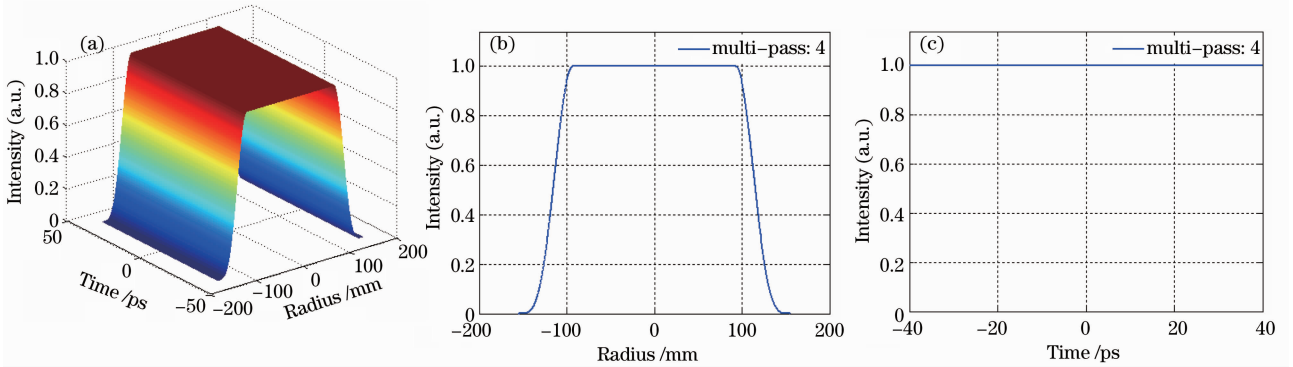


图 3 输出电场归一化光强分布(相对期望电场)。(a)二维光强分布；(b)沿径向的光强分布；(c)时间波形
Fig. 3 Normalized input intensity distribution (relative to expected field). (a) 2D intensity distribution; (b) intensity distribution along radial direction; (c) temporal shape

时间波形来说是一条直线,如图 3 所示。

4 啁啾脉冲的宽带放大逆问题的数值计算

增益介质特性如第三部分所述,啁啾脉冲的其他计算参数参考文献[10],脉冲激光持续时间 80 ps,脉冲半峰全宽 18 ps,电场时间波形满足六阶超高斯分布。

时间域上输出的期望啁啾脉冲激光可以表示为

$$E(r, z, t) = E_0(r, z) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{2m}\right] \times \exp\left[i\frac{\beta}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中 E_1 为入射电场的振幅, τ 为脉冲 e^{-1} 半宽, m 为超高斯阶次, β 为啁啾量。

计算中取 $m=6$ 和 $\beta=100$, 通过极化强度时域解析法和混合智能算法求解宽带放大逆问题, 该算法经过 29 次迭代可以满足电场 10^{-3} 的计算精度,

此时的输入脉冲的能量密度为 770.0600 J/m^2 , 相应的输入电场的时空强度归一化分布如图 4 所示, 所有纵坐标相对于期望输出电场的峰值作归一化处理。与图 3(b)、(c) 比较, 电场在径向仍然均匀放大, FWHM 为 231.1333 mm , 脉冲在时间波形上变化比较大, 这同样是因为期望电场的能量密度远偏离饱和能量密度, 空间畸变不明显, 而脉冲前沿通过放大介质时消耗的反转粒子数多于后沿, 所以脉冲前沿的放大能力大于后沿, 使得脉冲波形前沿变陡更快而后沿较慢。包络轮廓上类似于长脉冲激光放大的时间波形分布-前低后高, 如图 4(b)、(c) 所示。啁啾量越大, 时间波形畸变越大。后面的计算表明, 随着注入能量密度越大, 增益饱和和效应越明显, 脉冲波形畸变越大。啁啾量可以看作非线性相位调制, 其传输放大过程同样存在振幅和相位的相互演化, 这也是逆向反演的初始脉冲存在强度调制的根本原因。

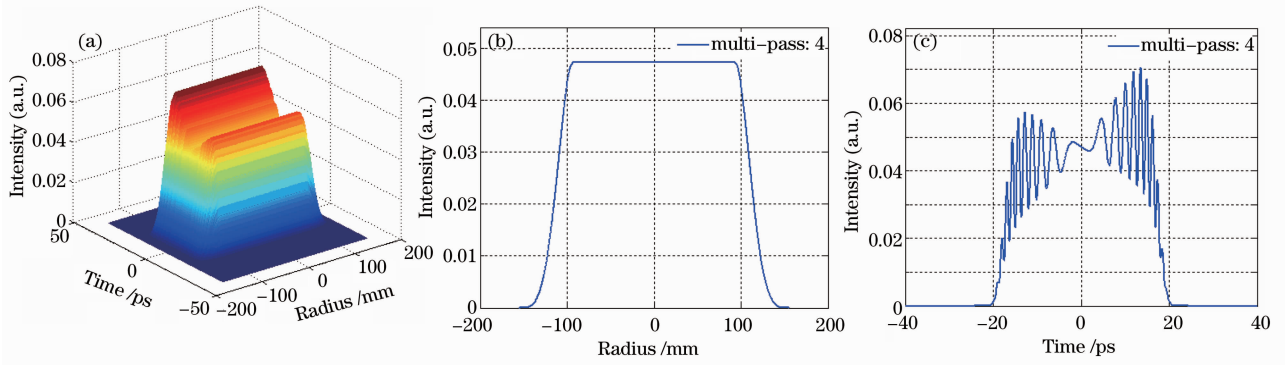


图 4 逆向反演的输入啁啾脉冲归一化光强分布(相对期望电场)。(a)二维光强分布；(b)沿径向的光强分布；(c)时间波形
Fig. 4 Normalized input chirped-pulse intensity distribution based on inverse problem of broadband amplification (relative to expected field). (a) 2D intensity distribution; (b) intensity distribution along radial direction; (c) temporal shape

将逆向反演的注入脉冲作为宽带放大器的输入条件,实际计算的输出脉冲能量密度为 1.5999 J/cm^2 , 与期望脉冲 1.6 J/cm^2 的偏差为 0.00625% ,该算法再次验证了混合智能算法在宽带放大逆问题中的精准、高效。计算的期望电场如图 5 所示,所有纵坐标对期望电场的峰值归一化。计算的期望电场的空间分布满足

参数为 0.4 的 Tukey 窗口,FWHM 为 231.1273 mm 。时间波形上满足六阶超高斯分布,FWHM 为 34.9202 ps 。与期望电场完全重合,如图 5(b)、(c) 所示。

考虑过饱和能密度的期望输出电场,能量密度 5.5 J/cm^2 ,经过 67 次迭代收敛于电场 10^{-3} 的精度,

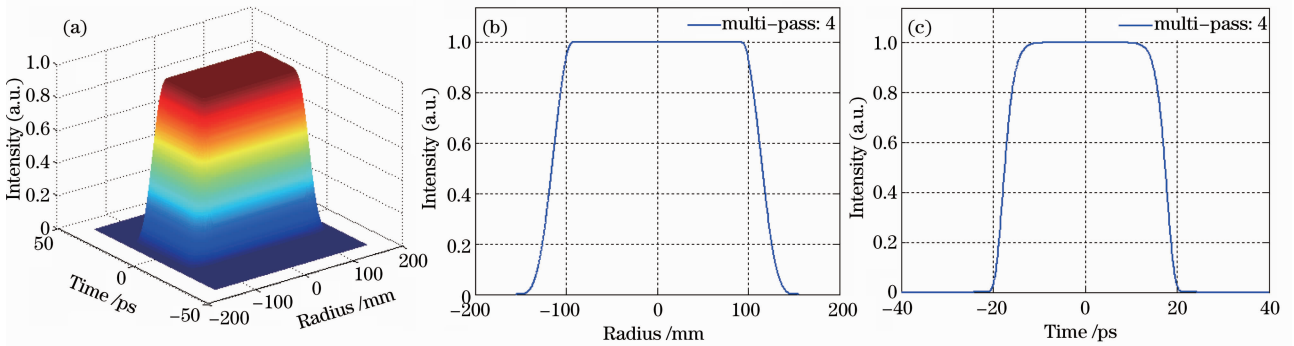


图 5 输出的啁啾脉冲归一化光强分布(相对期望电场)。(a)二维光强分布；(b)沿径向的光强分布；(c)时间波形
Fig. 5 Normalized output chirped-pulse intensity distribution (relative to expected field). (a) 2D intensity distribution; (b) intensity distribution along radial direction; (c) temporal shape

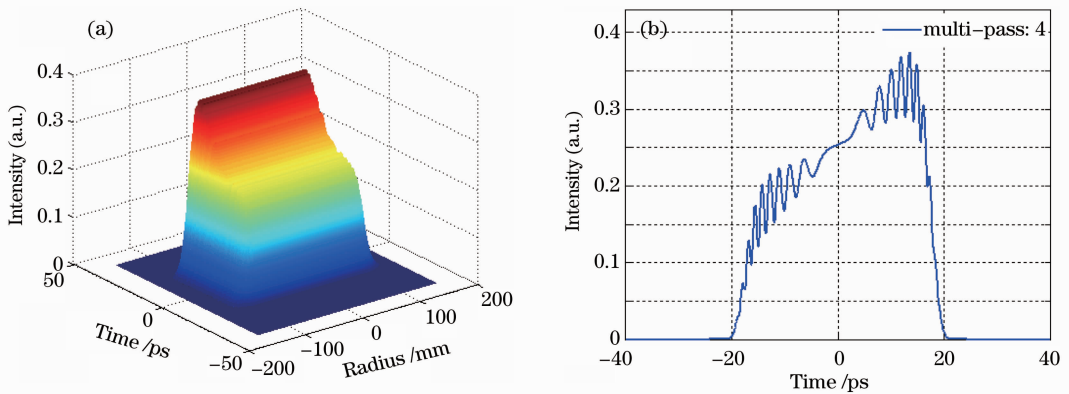


图 6 逆向反演的输入啁啾脉冲归一化光强分布(相对期望电场)。(a)二维光强分布；(b)沿径向的光强分布；(c)时间波形
Fig. 6 Normalized input chirped-pulse intensity distribution based on inverse problem of broadband amplification (relative to expected field). (a) 2D intensity distribution; (b) intensity distribution along radial direction; (c) temporal shape

逆向反演的注入脉冲能量密度 1.4241 J/cm^2 , 相应的输入电场的时空强度归一化分布如图 6 所示, 所有纵坐标相对于期望输出电场的峰值作归一化处理。电场在径向仍然均匀放大, 脉冲在时间波形上畸变比较大, 此时的 FWHM 为 211.3116 mm 。可知, 宽带放大状态下的增益窄化远小于准单色脉冲激光放大, 能够更好地保持脉冲形状。与图 5 比较知, 随着注入脉冲激光的能量密度靠近饱和能密度, 激光放大器的放大能力逐渐降低, 这主要归因于增益饱和效应。过饱和能密度情况下验证所得的实际输出为 5.4992 J/cm^2 , 与期望脉冲 5.5 J/cm^2 的偏差为 0.0145% 。以上两种不同条件下的期望电场的结果表明, 逆算法的精度是相当高的, 可以高效地满足工程需求。

5 结 论

对于应用于宽带放大逆问题的混合智能算法充分利用了遗传算法在全局搜索中的快速收敛特性以及 GS 算法在局域的迭代精准性, 同时结合极化强度时域解析法, 从而简化了放大器逆问题模型, 其求解过程也更加直观、易理解且具有统一算法模式。其次, 极化强度时域解析法的前提条件是脉冲持续时间远大于增益介质的退相时间, 因而纳秒脉冲相对于亚纳秒脉冲而言, 其近似程度更加合理、可靠。最后, 由于混合智能算法的适应性和通用性强, 可以拓展应用到超短脉冲或者宽带频率变换逆问题, 这些问题的解决将会对高功率激光放大系统的设计起到积极作用。

参 考 文 献

1 W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Hensian *et al.*. Optical

- propagation modeling for the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 66~72
- 2 M. Shaw, W. Williams, K. Jancaitis *et al.*. Performance and operational modeling of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2004, **5178**: 194~203
- 3 M. Shaw, W. Williams, R. House *et al.*. Laser performance operations model (LPOM): a tool to automate the setup and diagnosis of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2005, **5867**: 5867A
- 4 B. J. LE Garrec, O. Nicolas. Laser performance operation model and its application to LIL energy and power balance [C]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2008, **112**: 032019
- 5 M. Shaw, R. House, W. Williams *et al.*. Laser performance operations model (LPOM): a computational system that automates the setup and performance analysis of the National Ignition Facility [C]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2008, **112**: 032022
- 6 O. Morice, Miro'. Complete modeling and software for pulse amplification and propagation in high-power laser systems [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(6): 1530~1541
- 7 Lin Zunqi. Progress of laser fusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 8 O. Morice, X. Ribeyre, V. Rivoire. Broadband computations using the Miro software [C]. *SPIE*, 1996, **3492**: 832~838
- 9 Lu Xinghua, Wang Jiangfeng, Jiang You'en *et al.*. Theoretical study of FM-AM effect of broadband pulsed laser in a regenerative amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502012
卢兴华, 王江峰, 姜有恩等. 宽带光再生放大幅度调制效应的研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502012
- 10 Y. H. Chuang, L. Zheng, D. D. Meyerhofer. Propagation of light pulses in a chirped-pulse-amplification laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(1): 270~280
- 11 D. T. Pham, D. Karaboga. Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks [M]. New York: Springer, 1998
- 12 B. R. Wilkins. Analogue and Iterative Methods in Computation, Simulation and Control [M]. London: Chapman and Hall, 1970
- 13 L. M. Frantz, J. S. Nodvik. Theory of pulse propagation in a laser amplifier [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(8): 2346~2349
- 14 W. H. Lowdermilk, J. E. Murray. The multipass amplifier: theory and numerical analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(5): 2435~2444

栏目编辑: 宋梅梅