

谱色散匀滑化光束空间大尺度传输过程的模拟实现

李斌, 刘占军, 郝亮, 胡晓燕, 郑春阳, 项江

北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

摘要 谱色散匀滑化技术在大型激光聚变装置上得到了广泛应用。以焦平面内谱色散匀滑化光束的光强分布作为激光等离子体相互作用程序 LAP3D 的边界条件, 实现了谱色散匀滑化光束在黑腔大尺度等离子体传输过程中的模拟。采用改进算法实现了焦平面内谱色散匀滑化光束光强分布的高效并行计算, 从而对整个光束在等离子体中的传输过程进行模拟, 分析了谱色散匀滑化光束调制频率对光束传播的影响。

关键词 物理光学; 光束匀滑; 谱色散匀滑化; 数值模拟; 激光等离子体

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1201004

Accomplishment of Numerical Simulation for a SSD Beam Propagation in a Large Scale Plasma

Li Bin, Liu Zhanjun, Hao Liang, Hu Xiaoyan, Zheng Chunyang, Xiang Jiang

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China

Abstract Beam smoothing by spectral dispersion (SSD) technology is widely adopted in larger laser fusion facilities. Using intensity distribution of SSD beam at its focus plane as boundary condition of laser plasma simulation code LAP3D, we simulate the propagation of SSD beam in large scale hohlraum underdense plasma. High efficiency parallel calculation of intensity distribution of a SSD beam at its focus plane is accomplished with improved algorithm, and then the simulation of entire beam propagation can be processed. The effect of modulation frequency of SSD beam on beam propagation is analyzed.

Key words physical optics; beam smoothing; spectral dispersion smoothing; numerical simulation; laser plasma

OCIS codes 260.1960; 260.2030; 260.5950; 200.4960; 140.3295

1 引 言

现代大型激光聚变装置中普遍使用束匀滑光束来提高辐照均匀性^[1-2], 其中较为典型的是属于时域匀滑范畴的谱色散匀滑化(SSD)光束^[3-4], 它利用色散使整个光斑包络在横向上呈现为周期性抖动, 从而达到光束匀滑的效果。利用 SSD 光束可抑制受激布里渊散射(SBS)和成丝不稳定性(FI)这两种激光等离子体的不稳定性发展^[2]。为评估相关参数取值范围对 SSD 光束传播行为的影响, 以往研究通常利用衍射积分^[4-5]或求解定态薛定谔方程^[6]的方法来给出空间内 SSD 光束光强的分布形式, 但这些方法在物理建模中并没有考虑光束的散射和折射效应, 不能描述激光等离子体相互作用对入射光束的影响。因此, 应考虑用其他物理建模来描述激光在等离子体中的传输。

实验中产生的 SSD 光斑的横向长度通常约为数百微米。为了抑制成丝不稳定性, SSD 光束匀滑的时间尺度应与其小焦斑成丝发展的时间尺度相当^[1], 在数十皮秒量级。用粒子模拟类程序计算这种时空尺度的 SSD 光束激光等离子体相互作用过程时, 即使采用二维模拟也需要占用大量的并行计算资源, 而这在实践中较难实现。

收稿日期: 2017-06-06; **收到修改稿日期:** 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(11575035)

作者简介: 李斌(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大尺度激光等离子体相互作用理论和数值模拟方面的研究。E-mail: lb_academics@163.com

相对于粒子模拟类程序,激光等离子体流体程序对激光和等离子体分别采用包络和流体近似,在同等规模计算资源的条件下可解决更大时空尺度的物理问题^[7-9]。在激光等离子体流体程序 LAP3D^[10-13]中建立 SSD 光束的数值模型,在三维并行计算中发现,随着入射面空间尺度增大和相应网格数增加,单个计算步所需时间长达几十分钟。分析发现,在激光入射面内由并行计算区域分解生成的各个小区域中,每个时间步都需重复计算多个相同物理量的多重循环及求和,在大规模并行计算时,入射面被划分的区域越多,这种重复计算和区域间通信耗时就越显著。后期采用在预处理步时先计算与迭代时间无关的多重循环,再将此计算结果代入时间步循环的方法,大幅缩短了单个时间步所需的计算时间。

本文介绍了在大尺度激光等离子体相互作用流体程序 LAP3D 中实现模拟三维 SSD 光束的相关研究。主要介绍了产生 SSD 光束的基本原理及光强分布的理论形式,给出了改进后的适用于并行计算的 SSD 光束光强分布的算法,并给出了三维 SSD 光束在等离子体中传播的模拟结果,最后分析了调制频率对光束传播的影响。

2 SSD 光束光强的分布形式

SSD 技术通过展宽激光频率(激光带宽)实现时域去相干,表现为在光束横截面内不同位置处的频率不同,而且频率随时间而改变,这就要求入射激光需经过光栅和光电元件变换。假设入射光的光强分布为

$$E(t) = E_0(t) \exp(i\omega t), \quad (1)$$

式中 $E(t)$ 为入射光场, $E_0(t)$ 为入射光振幅, t 为时间, ω 为载波频率。光经过第 1 个光栅后,引入在 y 方向的时间延迟:

$$E_1(t) = E_0(t - \alpha_1 y) \exp[i\omega(t - \alpha_1 y)], \quad (2)$$

式中 $\alpha_1 = (2\pi/\omega)(\Delta\theta/\Delta\lambda)$, $\Delta\theta/\Delta\lambda$ 为光栅色散系数。接着,电光晶体对单频激光电场的相位进行调制,使电场强度变为

$$E_2(t, y) = E_0(t - \alpha_1 y) \exp[i\omega(t - \alpha_1 y) + i\delta \sin(\Omega_m t)], \quad (3)$$

式中 δ 和 Ω_m 分别为调制振幅和调制频率。随后,第 2 个光栅产生一个相对于第 1 个光栅反向的时间延迟,电场强度变为

$$E_3(t, y) = E_2(t + \alpha_1 y, y) = E_0(t, y) \exp\{i\omega t + i\delta \sin[\Omega_m(t + \alpha_1 y)]\}. \quad (4)$$

相调制的宽频激光经过三倍频晶体后,电场最终变为

$$E(t, y) = E_{3\omega}(t) \exp\{i3\omega t + i3\delta \sin[\Omega_m(t + \alpha_1 y)]\}. \quad (5)$$

式中 $E_{3\omega}$ 为三倍频光的振幅。

频谱展宽后的激光经过相位板和透镜后,根据 Fresnel 衍射积分和雅可比-安格尔恒等式

$\exp(iz \sin \theta) e = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(n) \exp(in\theta)$ 计算可得 SSD 光束在其焦平面上的光强分布为

$$E(x, y) = E_0 \exp(i3\omega t) \sum_n J_n(3\delta) \frac{\sin(n\gamma + q)}{n\gamma + q} \frac{\sin p}{p} \cdot \sum_{KL} \exp[i(n\Omega_m t - 2n\gamma L - 2Lq - 2Kp + \phi_{KL})], \quad (6)$$

式中 J_n 为 Bessel 函数, n 为阶数; 3δ 为调制振幅; $(p, q) = (x, y)k\Delta/(2f)$, x, y 为焦平面上的空间坐标, k 为三倍频后的波数, Δ 为相邻相位板面元之间的距离; ϕ_{KL} 为 (K, L) 通过相位板面元造成的相移, K 为 x 方向面元, L 为 y 方向面元; $\gamma = \alpha_1 \Delta/2$ 为不同频率激光以不同角度入射造成的位移。

3 SSD 光束的数值模型

LAP3D 程序用包络近似的傍轴波动方程来描述激光的传输过程^[10-13],可通过在入射面(左边界)给出 SSD 光束光强分布的形式来描述 SSD 光束在等离子体中的传输过程。

采用包络化近似,忽略第 2 节中激光焦平面上 SSD 光束光强分布公式(6)中的 3 倍频项 $\exp(i3\omega t)$,利用色循环定义 $N_c = \omega\alpha_1 D/(2\pi)$ (D 为光束口径)以及 F 数的定义 ($F \equiv f/D$) 对(6)式进行进一步化简,化简后可得激光等离子体流体程序 LAP3D 入射面上光强分布的数值模型为

$$E(x, y, t) = E_0 \sum_n J_n(3\delta) \cdot \text{sinc}[0.5k_{0y}(n \cdot N_c F\lambda + y)] \cdot \text{sinc}(0.5k_{0x}x) \cdot \sum_{KL} \exp\{i[n\Omega_m t - Lk_{0y}(n \cdot N_c F\lambda + y) - Kk_{0x}x + \phi_{KL}]\}, \quad (7)$$

式中 $k_{0y} \equiv 2\pi/(FN_y\lambda)$, $k_{0x} \equiv 2\pi/(FN_x\lambda)$, N_x, N_y 分别为沿 x, y 方向上相位板的面元个数, λ 为波长。

SSD 光束的谱宽度 $\Delta\nu = 2 \cdot 3\delta \cdot \Omega_m$ 。实验中通常取 SSD 光束的带宽为十几吉赫兹到上百吉赫兹, 调制频率 Ω_m 为 1~10 GHz, 模拟中可取调制振幅 δ 为 10~20 的整数。(7)式中对于第 1 类 Bessel 函数 J_n 展开求和, 其中的 n 为阶数, 理论上其取值范围为从负无穷到正无穷的所有整数。计算表明, 当 n 取 $|n| \gg 3\delta$ 的整数时, $\sum_n J_n$ 仍能有效逼近 $\exp[i3\delta \cdot \sin(\Omega_m t + \alpha_1 y)]$ 项。

按照 Skupsky^[3] 给出参数, 取调制振幅 $\delta = 12$, 调制频率 $\Omega_m = 2.5$ GHz, 利用 (7) 式计算一维 SSD 光束 (其周期性运动沿 y 方向进行) 在入射面内光强分布随时间的变化情况, 结果如图 1 所示, SSD 光束带宽范围 $\Delta\nu = 180$ GHz, 与 Skupsky^[3] 的结果一致, 表明 (7) 式能够描述 SSD 光束的特性。

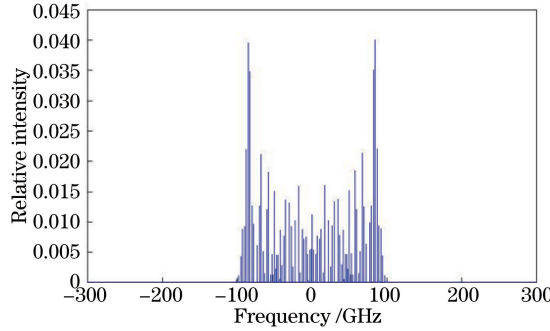


图 1 SSD 光束光强的频谱图

Fig. 1 Spectrogram of optical intensity of SSD beam

4 适用于并行计算的解法

第 3 节建立了描述二维平面内 SSD 光束光强分布的数值模型, 随后利用 LAP3D 程序采用 (7) 式计算了 SSD 光束传输, 在并行计算中发现单个时间步耗时较长, 甚至超过 1 h。分析发现, 这是由于按照 (7) 式计算时会涉及 n, K, L, x 和 y 这 5 个变量的嵌套循环及求和, 而并行计算采用的空间区域分解方法并不能减少这方面的计算量, 反而因区域间通信增加了完成单个时间步的计算时间。

为了提高计算速度, 对算法进行改进。分离出 (7) 式中每个计算步骤都重复计算的数据, 在开始时间循环步之前先计算 $E\text{TEMP}(x, y, n)$, 其定义为

$$E\text{TEMP}(x, y, n) = E_0 \text{sinc}[0.5k_{0y}(n \cdot N_c F\lambda + y)] \cdot \text{sinc}(0.5k_{0x}x) \cdot \sum_{KL} \exp[-iLk_{0y}(n \cdot N_c F\lambda + y) - iKk_{0x}x + i\phi_{KL}], \quad (8)$$

然后进入时间循环, 每个时间步内求解入射面内 SSD 光束光强的分布, 即

$$E(x, y) = \sum_n E\text{TEMP}(x, y, n) J_n(3\delta) \exp(in\Omega_m t), \quad (9)$$

式 (9) 中每个计算步都涉及对 n 的求和。由第 3 节可知, n 的取值范围与入射面大小及所取网格规模无关, 只与调制振幅有关, 所需求和阶数的量级约为 $O(10^2)$ 的一半。与旧算法相比, 改进算法在并行计算时可大幅提高计算速度。改进算法与旧算法单个时间步所需时间的对比如表 1 所示。

表 1 新旧算法的耗时比较

Table 1 Comparison of consuming time between the improved algorithm and the old one

Case	Number of grid (x, y, z)	Number of cores	Consuming time /s	
			Old algorithm	Improved algorithm
1	(256, 256, 1024)	960	>3600	0.8
2	(512, 512, 1024)	960	>3600	0.8
3	(1024, 1024, 1024)	960	>3600	0.8

采用改进算法模拟了 SSD 光束在黑腔等离子体条件下的传输过程,对应的物理条件:电子温度 3 keV,离子温度 1 keV,等离子体长度 $2000\lambda_0$ (λ_0 为激光波长),密度 $0.1n_c$ (n_c 为电子临界密度)。算例对应的网格规模及计算核数如表 1 中算例 3 所列,多次重复计算显示其达到稳态所需的计算时间约为十几小时,远小于采用旧算法模拟所需的计算时间。

5 SSD 光束调制频率对光束传输过程的影响

SSD 光束传输结果如图 2 所示。理论分析表明,SSD 光束在空间传输过程中会在横向上呈现出扫描运动行为^[1,14]。LAP3D 程序的模拟结果也显示光束从入射面开始传输一段距离后,在该处的光强空间分布与激光入射面内的光强分布相同,如图 2 所示。从理论上可估计这段距离约为 c/Ω_m ,其中 c 为光速。图 2 对应的模拟算例取 $\Omega_m = 10^{-3}\omega_0$, ω_0 为激光频率,长度约为 $1000\lambda_0$ 。图 2 中显示长度约为 $1000\lambda_0$,与理论预期相符。其他模拟算例也证实了这段长度与调制频率的关系。

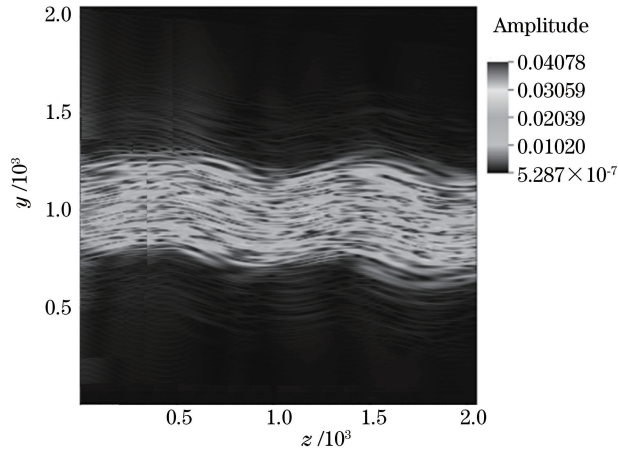


图 2 SSD 光束沿传播方向截面内的激光电场分布

Fig. 2 Distribution of laser electric field in cross section of SSD beam propagation direction

对于经连续相位板产生的空间束匀滑光束,可认为其在瑞利长度内沿光路直线传播,但 SSD 这种时间束匀滑光束的“扫描”运动表明,光束在与调制频率相关的特征长度内并不是沿直线传播的,在某些情况下 SSD 光束可能会与其他光束发生重叠,或在通过光路上的光学孔径时发生“挂边”现象。上述情况表明,在应用 SSD 光束时应考虑光束横向“扫描”对其传输产生的影响。

6 结 论

随着 SSD 光束在大型激光装置中的广泛应用,需要研究整个模拟区域内该类光束的传输行为。与以往研究中采用的数值模拟方法相比,本课题组对光束传输过程采用包络化近似的传播方程,不仅可以模拟整个传输区域内光束的传播过程,而且在并行计算条件下解决了模拟区域入射面内高效计算光束光强分布的问题。基于上述物理和数学建模方法,利用 LAP3D 程序通过大规模并行计算获得了 SSD 光束在整个传输空间内的传播图像。数值模拟结果显示,SSD 光束在垂直于传播方向上存在“扫描”行为,该模式发展的快慢与光束调制频率密切相关,后续将进一步深入研究该特性对光束传输造成的影响。

参 考 文 献

- [1] John D L, Peter A, Richard L B, *et al.* The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] Zhang Rui, Li Ping, Su Jingqin, *et al.* Experimental research of target uniform illumination using smoothing by spectral dispersion and continuous phase plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054204.
张锐, 李平, 粟敬钦, 等. 采用光谱色散平滑和连续相位板实现靶面均匀辐照的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054204.

- [3] Skupsky S, Short R W, Kessler T, *et al.* Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [4] Zhou Shenlei, Zhu Jian, Li Xuechun, *et al.* Experimental study of smoothing by spectral dispersion[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(3): 321-325.
周申蕾, 朱俭, 李学春, 等. 光谱色散平滑的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 321-325.
- [5] Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi, *et al.* Research on the diffraction characteristics of phase modulated laser beams dispersed spectrally[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(9): 4595-4601.
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 等. 光谱色散后的相位调制光束衍射特性研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(9): 4595-4601.
- [6] Liu Lanqin, Zhang Ying, Geng Yuanchao, *et al.* Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(16): 164201.
刘兰琴, 张颖, 耿远超, 等. 小宽带光谱色散平滑光束传输特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(16): 164201.
- [7] Hinkel D E, Callahan D A, Langdon A B, *et al.* Analyses of laser-plasma interactions in National Ignition Facility (NIF) ignition targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5): 056314.
- [8] Glenzer S H, Arnold P, G Bardsley, *et al.* Progress in long scale length laser plasma interactions[J]. *Nuclear Fusion*, 2003, 44(12): S185-S190.
- [9] Langer S H, Bhatele A, Still C H. pF3D simulations of laser-plasma interactions in national ignition facility experiments[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2014, 16(6): 42-50.
- [10] Li Bin, Liu Zhanjun, Zheng Chunyang, *et al.* Numerical studies of Gaussian laser beam deflection in hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 122005.
李斌, 刘占军, 郑春阳, 等. 黑腔中高斯型激光束偏折的模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(12): 122005.
- [11] Hu X Y, Hao L, Liu Z J, *et al.* The development of laser-plasma interaction program LAP3D on thousands of processors[J]. *Aip Advances*, 2015, 5(8): 87174.
- [12] Li Bin, Hu Xiaoyan, Zheng Chunyang, *et al.* Numerical simulation of filamentation for spatially smoothing beam in hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(11): 112004.
李斌, 胡晓燕, 郑春阳, 等. 黑腔中空间束平滑光束成丝不稳定性的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(11): 112004.
- [13] Liu Z J, Li B, Hu X Y, *et al.* The light diffraction effect on stimulated Raman scattering[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(2): 022705.
- [14] Cheng Wenyong, Zhang Xiaomin, Su Jingqin, *et al.* Suppression of small-scale self focusing of high power laser using moving beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7012-7016.
程文雍, 张小民, 粟敬钦, 等. 利用运动光束抑制高功率激光小尺度自聚焦[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7012-7016.