

聚焦脉冲激光大气传输热晕效应的数值分析*

冯晓星, 范承玉, 王英俭, 乔春红

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 利用激光大气传输四维程序对序列脉冲激光大气传输热晕效应进行了数值计算和分析。对于均匀大气路径上聚焦传输序列脉冲激光进行数值仿真计算得到, 风场渡越时间内的脉冲数 N_p 在 2~6 之间有利于传输; 然后对实际大气模式下序列脉冲激光进行了数值计算, 得到的平均脉冲数 N_p 可以在一定条件下对序列脉冲激光进行定量表征的结论。

关键词: 激光大气传输; 序列脉冲; 风场渡越时间; 数值计算

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0574-04

Numerical analysis of thermal blooming effects for focusing multi-pulse laser propagation in atmosphere

FENG Xiao-xing FAN Cheng-yu WANG Ying-jian QIAO Chun-hong

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Inst. of Optics and Fine Mechanics
Academia Sinica, Hefei 230031, China)

Abstract The thermal blooming effects of focusing multi-pulse laser was computed and analyzed by four-dimension code of laser propagation in atmosphere. The laser efficiency of propagation can be improved by using multi-pulse laser in the uniform atmosphere when the number of pulses per flow time N_p is from 2 to 6. The defined average pulses N_p can describe thermal blooming effects of multi-pulse laser propagating through the practical air under certain conditions.

Key words Propagation; Multi-pulse; Gas transit time across the beam; Numerical calculation

1 引 言

高功率激光在大气中传输时受到湍流效应和热晕效应的影响, 导致激光光束质量的严重退化, 热晕效应严重时还限制其到达目标上的最大激光功率密度。脉冲激光大气传输热晕效应对靶平面的影响需要进行详细的研究, 数值仿真是其中一个重要的手段^[1, 2]。

由于短脉冲激光自热晕效应为 t 的 3 次方热晕效应, 激光脉冲宽度越短自热晕效应越小, 所以可以采用序列短脉冲来提高激光大气传输的效率。对于序列短脉冲激光大气传输, 脉冲本身还受到自聚焦、大气击穿等效应影响, 它们限制了脉冲的峰值功率。

因此, 为了有利于激光大气传输并能提高靶平面上激光功率密度, 需要结合实际大气参数综合考虑脉冲的重复频率、脉冲宽度、脉冲峰值功率等。目前, 国内外关于序列脉冲激光大气传输热晕效应的研究报道比较少。本文主要通过数值仿真的方法对聚焦传输的序列短脉冲激光进行一些初步的探讨, 并为工程应用提供一些依据及参考。

2 脉冲激光大气传输的数值计算方法

数值模拟是对激光大气传输及其相位补偿进行理论研究的重要方法, 也是对一些激光工程应用中的大气传输问题进行定量评价的重要手段。完全描述高能激光大气传输热晕效应的基本方程组包括光波

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-10

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 冯晓星 (1981—), 硕士, 研究领域为激光大气传输热晕效应及其数值模拟计算。

E-mail: fengxiaoxing81@163.com

传输方程及激光与大气的热相互作用方程 (即折射率扰动方程)。对于激光大气传输来讲无论是连续激光还是脉冲激光, 它们的光波传输方程都是一样的, 主要差别来自于折射率扰动方程即激光与大气的热相互作用方程^[3]。

对于重复频率序列脉冲激光大气传输而言, 每个脉冲不仅受其本身自热晕的影响, 同时还可能受到前一系列激光脉冲的影响。而且在脉冲序列较长时, 还要考虑风速的影响。由于脉冲宽度和脉冲时间间隔通常非常短, 当传输到第 n 个激光脉冲时, 前一系列激光脉冲对第 n 个激光脉冲过程可以认为是等压 (或者准稳态) 过程。因此当激光为序列脉冲激光时, 大气密度扰动方程修改为下式, 即序列脉冲激光与大气相互作用方程

$$\frac{\partial \varrho^p}{\partial t} + v \frac{\partial \varrho^p}{\partial x} = - \frac{(\gamma - 1)}{c_s^2} \alpha \sum_n \tau_n(x, y) \times \delta(t - t_n) \quad (1)$$

式中 ϱ^p 表示脉冲激光引起大气密度变化量, v 为风速, $I_n(x, y)$ 表示第 n 个激光脉冲时间内的光强密度平均值, τ 为脉冲宽度, 那么 $\tau_n(x, y)$ 就表示激光大气传输时大气吸收能量对此脉冲的影响。因为每个脉冲产生自热畸变时间比建立压强平衡时间短很多, 也就是说在每个脉冲宽度时间内, 等压平衡来不及建立, 所以方程右边乘以 δ 函数来表示每个脉冲自热畸变产生的密度影响。

在数值模拟计算中, 取相邻两个脉冲时间间隔 Δt 为时间计算步长。由傅立叶变换方法求解方程 (1) 并进行修正, 可以得到 $t = n\Delta t$ 时大气吸收激光能量产生密度变化量

$$\varrho(x, y; n\Delta t) = \varrho^p(x - v\Delta t, y; (n-1)\Delta t) + \varrho^p \quad (2)$$

在此假设风沿 x 方向, 则逆风区满足: $\varrho^p(x, y, t) = 0$ 。式 (2) 中右边第一项表示考虑风场的影响后, 前 $n-1$ 个激光脉冲对传输路径大气密度改变总和。右边第二项则表示第 n 个脉冲本身自热晕对传输路径上大气密度变化的作用。在数值模拟计算中, 由于激光脉宽非常短, 每个脉宽时间内产生的密度变化 ϱ^p 不可能像连续激光那样选取多个抽样时间点进行详细计算, 所以采用一个时间点代替整个脉冲时间内的密度变化。每个脉冲自诱导热畸变导致密度变化量 ϱ^p 可采用完全线性化流体力学方程组来求解得到。在数值模拟中假设脉冲在时间上为三角形, 数值计算表明中等热晕效应下这种三角近似计算结果与理

论分析相一致, 能够很好地反应热晕效应对序列脉冲激光大气传输的影响。最后通过密度变化可以得到大气折射率的变化^[4-5]。

3 数值计算结果

3.1 均匀传输模式

对于均匀传输路径, 选取的计算参数分别为: 激光平均功率 $P = 80 \text{ kW}$, 发射孔径 $D = 0.5 \text{ m}$, 波长为 $10.6 \text{ }\mu\text{m}$, 截断高斯光束聚焦传输距离 $z = 6 \text{ km}$, 吸收系数 $\alpha = 0.2 \text{ km}^{-1}$, 风速 $v = 10 \text{ m/s}$ 。研究序列脉冲激光大气传输热晕效应时, 还需要引进参数 N_p , 即风场渡越时间内的脉冲数^[6]

$$N_p = D \cdot f / v_{\text{ind}}$$

式中 v_{ind} 为大气风速大小。激光脉冲重复频率 f 分别为 $40, 80, 120$ 和 160 Hz 对应的风场渡越时间内的脉冲数 N_p 分别为 $2, 4, 6, 8$ 。

图 1 给出了通过数模拟计算得到的在不同距离处光强分布与风场渡越时间内脉冲数的关系。由图 1 可得: 对于相同激光和大气参数条件, 随着传输距离的增加序列脉冲激光的传输热晕效应与连续激光传输的差别越来越大; 并且随着 N_p 的增加热晕效应越严重, 越接近连续激光传输状态; 另外, 由图 1 还可得到风场渡越时间内的脉冲数越少, 热晕效应的影响越弱, 越有利于激光的大气传输。图 2 给出了相应的长时间平均聚焦光斑峰值光强与风场渡越时间内脉冲数的关系。由图 2 可以得到, 风场渡越时间内脉冲数为 2 时的峰值光强是连续激光峰值光强的 2.5 倍。由此可见选取合适的 N_p , 脉冲激光更有利于大气传输, 提高靶平面的功率密度。这些数值模拟计算结果与文献 [4] 结果一致, 说明这种数值模拟方法比较可靠的。

3.2 脉冲宽度对激光大气传输的影响

前面的数值模拟并没有考虑脉冲宽度对传输的影响, 这里将考虑脉冲宽度的变化对聚焦脉冲激光的影响。计算参数选取与前面相同, 脉冲重复频率分别取 $10 \text{ Hz}, 15 \text{ Hz}, 20 \text{ Hz}, 40 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz}, 120 \text{ Hz}, 160 \text{ Hz}$ 相应地 N_p 在 $1 \sim 16$ 之间变化, 取脉冲宽度分别为 $10 \text{ }\mu\text{s}, 30 \text{ }\mu\text{s}, 50 \text{ }\mu\text{s}, 80 \text{ }\mu\text{s}, 100 \text{ }\mu\text{s}$ 。图 3 和图 4 给出了不同重复频率下对应的 N_p 与环围 Strehl 比以及环围半径的关系。

由图 3 可得到: 在相同的发射功率以及不同脉冲宽度下, 当 $N_p > 2$ 时, 随着重叠热晕作用的不断增加, 63.2% 环围能量 Strehl 比都随着 N_p 增加而减小; 当

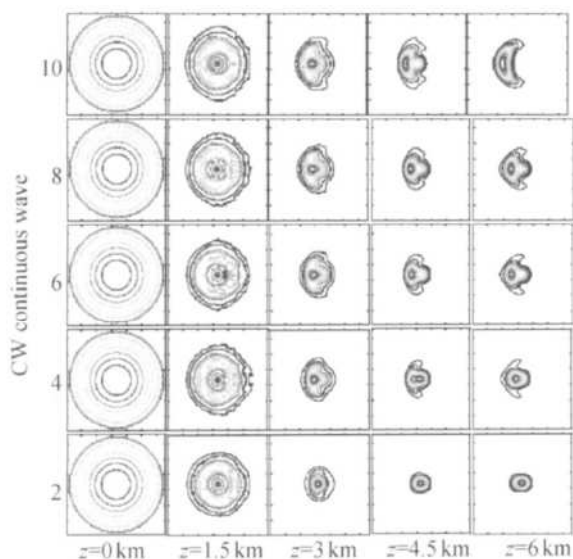


Fig. 1 Intensity contours for multiple-pulse laser beam as a function of pulses per flow time and at different ranges in kilometers

$N_p > 8$ 时环围 Strehl 比随 N_p 变化越来越缓慢, 并接近连续激光时的值。另外从图 3 还可以看出, 脉冲宽度大于 $50 \mu\text{s}$ 时, 环围 Strehl 在 $N_p = 1.6 \sim 2$ 时出现了极值点, 此时环围 Strehl 比值大于 $N_p = 1$ 时的值。这是因为当脉冲宽度增加时, 单脉冲自热晕效应增加, 激光光束扩展较大并且此时第一个脉冲自热晕足以引起下一个脉冲向中心发生偏折, 所以可能造成单脉冲自热晕的影响比两个脉冲重叠热晕的影响还严重, 导致 N_p 在 1.6 或者 2 时环围 Strehl 出现极值。但是当脉冲宽度小于 $50 \mu\text{s}$ 时并没有出现上述情况。因为脉冲宽度越短, 单脉冲激光非线性热畸变越弱, 第一个脉冲自热晕效应引起的传输路径上折射率变化不足以引起第二个脉冲发生偏折, 此时重叠脉冲热晕效应起主导作用。由图 2 可以看到, 63.2% 环围能量半径变化正好与环围 Strehl 比值相对应, 这也说明脉

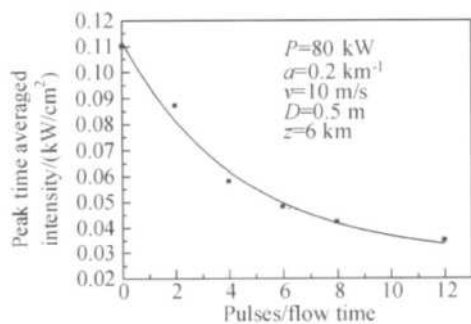


Fig. 2 Peak intensity as a function of pulses per flow time for a multiple-pulse thermally bloomed laser beam

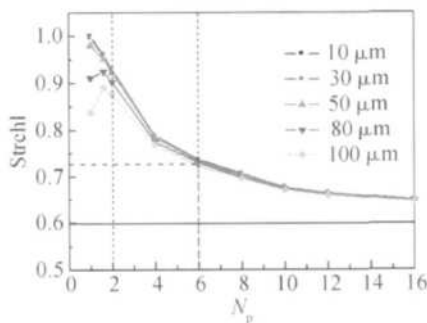


Fig. 3 Strehl of 63.2% encircled energy and N_p

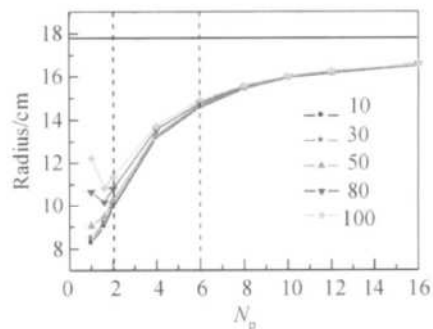


Fig. 4 Radius of 63.2% encircled energy and N_p

冲宽度越长, 单个脉冲自热晕效应越严重, 此时就有可能导致 $N_p = 2$ 出现上述情况。

由图 3 和图 4 中还可得到: 当脉冲重复频率比较低时, 即风场渡越时间内脉冲数 N_p 小, 脉冲宽度改变对环围 Strehl 比和环围半径影响较为明显; 当重复频率越高, 脉冲宽度的变化影响越弱。很明显, 这是由于脉冲激光重叠热晕效应导致的。风场渡越时间内的脉冲数 N_p 在 2~6 之间有利于传输。

3.3 实际大气传输模式

对于传输路径上均匀风场以及吸收模式情况下, 序列脉冲激光聚焦传输热晕效应的特征规律性很强而且比较明显。然而实际大气中风场以及大气吸收都是随时空的变化而变化的, 接下来分析实际大气模式下序列脉冲激光传输热晕效应的影响。因为实际发射激光光束近似为平台光束, 截断高斯光束与平台光束分布比较相似, 大气对这两种光束影响比较相近, 所以这里采用平台光束来进行数值模拟。选择实心平台光束上行聚焦传输 20 km, 波长 $10.6 \mu\text{m}$, 发射口径为 0.5 m, 初始光束衍射极限倍数 B_0 为 1.0。

吸收模式采用美国标准大气北半球中纬度冬季和夏季两种吸收系数模式; 风场分别采用合肥地区 and 新疆某地区的全年平均风场模式。因为采用实际大气模式, 在传输路径上风速和吸收系数都随着高度而变化, 所以这里考虑风速以及吸收系数的影响, 采用传输路径上 N_p 积分的平均值, 定义如下

$$N_p = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{2a \cdot \alpha(z)}{v_{\text{ind}}(z)} \cdot f dz / \left(\frac{1}{L} \int_0^L f(z) dz \right) = \frac{2a \cdot f \int_0^L \frac{\alpha(z)}{v_{\text{ind}}(z)} dz}{\int_0^L f(z) dz} \quad (4)$$

式中 L 为传输距离, v_{ind} , $\alpha(z)$ 分别为随高度变化的风速和吸收系数大小。脉冲重复频率 f 和脉冲宽度

对热畸变效应影响非常大,为提高激光传输效率脉冲宽度取为 $5 \mu\text{s}$, 脉冲重复频率分别取 10 Hz 20 Hz 40 Hz 80 Hz 120 Hz 160 Hz 200 Hz 来进行分析和比较。激光发射功率分别为 100 kW 和 200 kW 。

图 5 和图 6 分别给出了在不同吸收模式以及不同风场模式下,发射功率分别为 100 kW 和 200 kW , 激光大气传输热晕效应到达稳定时 63.2% 环围能量 Strehl 比值与平均风场渡越时间内脉冲数的关系。从图 5 可以看到,对于合肥地区风场模式条件下,环围 Strehl 比都随着 N_p 增加减小,冬季吸收模式热晕效应的影响明显小于夏季吸收模式;而且不同吸收模式和发射功率下,当 $N_p < 2$ 时即 $f < 40 \text{ Hz}$ 环围 Strehl 比都大于连续激光时的值。从图 6 中看到,在相同的吸收模式即冬季吸收模式下,合肥和新疆两种风场模式,环围 Strehl 比也都随着 N_p 增加减小而且变化也比较一致;当 $N_p < 2.7$ 时,环围 Strehl 比都大于连续激光时的值。

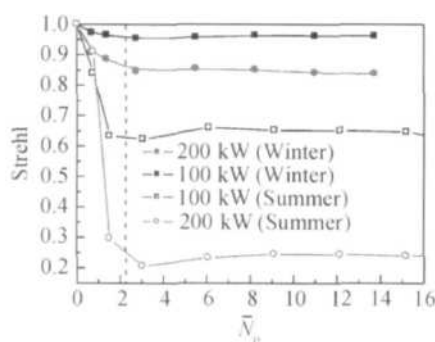


Fig. 5 Strehl of 63.2% encircled energy and N_p

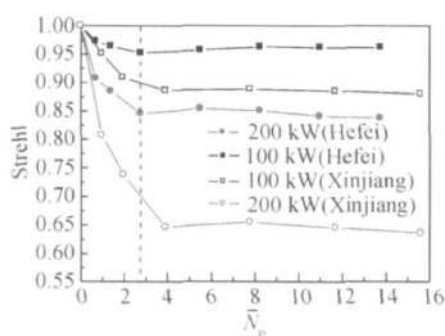


Fig. 6 Strehl of 63.2% encircled energy and N_p

以上的数值计算和分析表明,在一定条件下,平均风场渡越时间内的脉冲数 N_p 是一个有效的评估实际大气脉冲激光热畸变效应的参数。在合肥和新疆不同地方风场和不同季节吸收模式下, N_p 大体上小于 2 序列脉冲激光传输占优势;其中与均匀路径

上热晕效应的差别主要因为实际大气模式比较复杂,风场和吸收系数都是随着高度而变化导致的。

4 结 论

本文通过对聚焦脉冲激光不同条件下大气传输热晕效应的数值分析,得到在一定条件下采用序列脉冲激光有利于激光大气传输。对于均匀传输路径上,热晕效应对激光束的影响一般随着 N_p 的增加而增大,因此为了提高传输效率 N_p 通常取在 $2 \sim 6$ 之间;另外,对于聚焦传输的短脉冲激光来讲,由于单脉冲自热晕与两个脉冲的重叠热晕效应的竞争结果也导致在 $N_p = 2$ 附近环围 Strehl 比出现一个峰值。因此, N_p 在 2 左右可能序列脉冲传输的最佳参数。

通过采用传输路径积分平均值 N_p 对实际大气风场和吸收模式进行的数值分析,可以认为在一定范围内, N_p 是一个有效地评估实际大气脉冲激光热畸变效应的参数。然而实际脉冲激光大气传输中,还将受到自聚焦以及大气击穿等效应的限制,脉冲宽度不是越短对传输越好。而且实际大气中必然存在大气湍流,湍流对热晕的影响本文也没有考虑。湍流和热晕相互作用是此领域的一个难点,实际应用中它们的相互作用需要进一步细致地计算分析。

参考文献:

- [1] 胡少六,江超,李波,等.用于激光推进的高功率激光器的选择.强激光与粒子束,2004 16(7).
- [2] 辜建辉,徐启阳,李再光,等.激光推进原理与技术.推进技术,1995 16(2). (GU Jin-hui XU Qiyang LI Zaiguang et al Fundamental theory and technology of laser propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 1995 16(2).)
- [3] 王英俭.激光大气传输及其位相补偿的若干问题探讨[D].合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所,1996.
- [4] Fleck JA, Morris JR, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere [J]. Appl. Phys., 1976 (2): 129~160
- [5] Fleck JA, Morris JR, Feit M D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere ① [J]. Appl. Phys., 1977, 14(1): 14~19
- [6] Smith D C. High-power laser propagation: Thermal Blooming [C]. Proceedings of the IEEE, 1977, 65(12).