

# 列阵平顶光束大气传输的热晕效应

李晓庆<sup>1\*</sup>, 曹建勇<sup>1,2</sup>, 丁洲林<sup>1</sup>, 季小玲<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 四川师范大学物理与电子工程学院, 四川 成都 610101;

<sup>2</sup> 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064

**摘要** 研究了热晕效应对相干合成和非相干合成的列阵平顶光束在大气中传输的影响。结果表明:当列阵平顶光束在大气中传输且存在横向风时,光斑呈月牙状;相干合成时,光斑内存在多个光强峰值;非相干合成时,光斑内始终保持一个峰值;相对于列阵平顶光束的相干合成,非相干合成受热晕的影响较小;光束阶数  $N$  越大的列阵平顶光束受热晕的影响越小,即相对于列阵平顶光束,列阵高斯光束( $N=1$ )受热晕的影响更大;光束传输效率在自由空间中随着  $N$  的增大而减小,在大气中则随着  $N$  的增大而增大;在大气中且功率相同时,列阵平顶光束的传输效率优于列阵高斯光束的传输效率。

**关键词** 物理光学; 大气光学; 热晕效应; 列阵平顶光束; 相干合成; 非相干合成

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0126020

## Thermal Blooming Effect of Flat-Topped Laser Beam Array Propagating Through Atmosphere

Li Xiaoqing<sup>1\*</sup>, Cao Jianyong<sup>1,2</sup>, Ding Zhoulin<sup>1</sup>, Ji Xiaoling<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China;

<sup>2</sup> College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** The influence of thermal blooming effect on the flat-topped laser beam array propagating through the atmosphere is studied, where coherent beam combination and incoherent beam combination are considered. The results show that the beam spot of flat-topped laser beam array propagating through the atmosphere with cross wind is like a crescent pattern. For coherent beam combination, multiply intensity peaks exist in the beam spot. For incoherent beam combination, there is always one intensity peak. The flat-topped laser beam array for incoherent beam combination is less affected by the thermal blooming than that for coherent beam combination. The flat-topped laser beam array with larger beam order  $N$  is less affected by the thermal blooming than that with smaller one. Hence, comparing with the flat-topped laser beam array, the thermal blooming is more serious for the Gaussian beam array ( $N=1$ ). With the increase of  $N$ , the propagation efficiency decreases in free space, but it increases in the atmosphere. Under the condition of the same beam power in atmosphere, the propagation efficiency of flat-topped laser beam array is better than that of Gaussian laser beam array.

**Key words** physical optics; atmospheric optics; thermal blooming effect; flat-topped laser beam array; coherent beam combination; incoherent beam combination

**OCIS codes** 260.3160; 010.1290; 010.1030; 140.3298; 190.5940

## 1 引 言

为了达到高功率系统、惯性约束聚变、高能武器等在实际应用中所需的功率水平,列阵激光束被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。相干合成(CBC)和非相干合成(IBC)是两种主要的光束合成方式。目前,关于列阵激光束

在自由空间、大气湍流和海洋湍流中的传输特性已有大量研究<sup>[4-13]</sup>;文献[5-8]研究了列阵高斯光束、列阵高斯-谢尔模型光束、列阵厄米-高斯光束、列阵艾里光束等在自由空间中的传输;文献[9-12]研究了以上列阵光束在大气湍流中传输的方向性和闪烁;文献[13]研究了矩形分布的列阵高斯光束在海

收稿日期: 2018-08-16; 修回日期: 2018-10-15; 录用日期: 2018-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61505130, 61775152)

\* E-mail: lixiaoqing912@sicnu.edu.cn

湍流中传输的平均光强,并对相干合成和非相干合成的情况进行了对比。

当一束高功率激光在大气中传输时,传输路径上的大气分子和气溶胶粒子会吸收一部分光束能量。吸收的能量会加热空气,使其折射率发生改变,进而使激光束波前发生畸变,这种非线性效应称为热晕效应。热晕效应严重限制了激光光束的传输功率。Gebhardt 等<sup>[14]</sup>研究了激光大气传输近场稳态热晕的解析解。文献[15-16]用数值模拟的方法研究了热晕效应对一束高斯光束和截断高斯光束在大气中传输的影响。在某些研究和开发应用领域,能量不均匀分布会限制激光束的使用。1994年, Gori<sup>[17]</sup>首次提出了平顶高斯光束的概念。研究人员对列阵平顶光束在自由空间和大气湍流中的传输特性进行了大量研究<sup>[18-20]</sup>。迄今为止,热晕效应对列阵平顶光束大气传输的影响还未见报道。鉴于此,本文利用自行编制的含时四维仿真程序,将光束重心、峰值 Strehl 比、二阶矩束宽、传输效率作为光束质量评价参数,采用数值模拟方法研究热晕效应对相干合成和非相干合成的列阵平顶光束在大气中传输的影响,并对得到的结果给出物理解释。

## 2 理论模型

列阵平顶光束在源平面的光强分布  $I$  如图 1 所示。一束径向分布的列阵平顶光束放置在源平面上,并沿着  $z$  轴在大气中传输。光束的中心位置为  $(a_i, b_i)$  的一束平顶激光束的光场分布<sup>[21]</sup>为

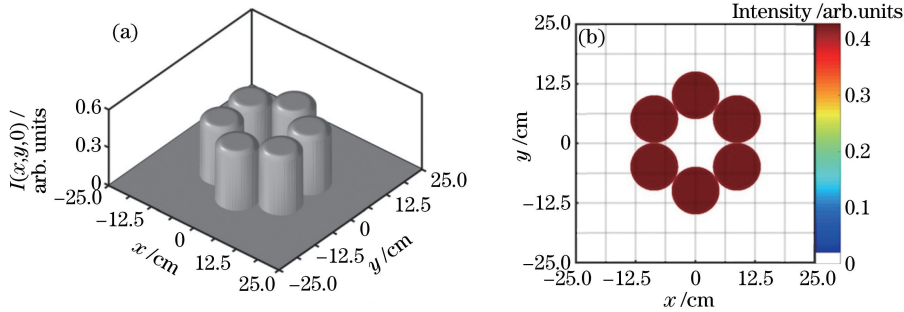


图 1 列阵平顶光束在源平面上的光强分布。(a)三维分布;(b)二维分布

Fig. 1 Intensity distribution of flat-topped laser beam array at source plane. (a) 3D distribution; (b) 2D distribution

### 1) 光束重心

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint x I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint y I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \end{cases}, \quad (3)$$

$$E_i(x, y, z) = E_0 \sum_{m=1}^N \frac{(-1)^{m-1} \binom{N}{m}}{N} \cdot \exp\left[-\frac{m(x-a_i)^2 + m(y-b_i)^2}{2\omega_0^2}\right], \quad (1)$$

其中

$$E_0 = \sqrt{\frac{P}{2\pi\omega_0^2 \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{m+n-2} \binom{N}{m} \binom{N}{n}}{N^2} \frac{1}{m+n}}}}, \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为初始场的振幅;  $N$  为平顶光束的阶数,  $N=1$  时表示高斯光束;  $\omega_0$  为高斯光束的束腰半径;  $P$  为激光的入射功率。列阵平顶光束的合成考虑相干和非相干 2 种合成方式。相干合成时,假设每束子光束为相位相同的完全相干的平顶光束,则列阵平顶光束的光场由每束子光束的光场叠加产生。非相干合成时,假设每束子光束为完全非相干的平顶光束,则每束子光束分别独立传输,列阵平顶光束的光强由每束子光束的光强叠加产生。

基于傍轴近似下的波动方程和等压近似下的流体力学方程<sup>[22]</sup>,利用相位屏法和快速离散傅里叶变换法,编制相干和非相干合成列阵平顶光束在大气中传输的含时四维仿真程序。特别地,在傍轴近似下,传输距离为  $z$  时的光束光强  $I = |E|^2 \cdot \exp(-\alpha z)$ ,其中  $E$  为光场分布,  $\alpha$  为空气衰减系数。为了表征热晕效应对列阵平顶光束在大气中传输的影响,引入以下光束质量评价参数。

式中:  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为沿  $x$  方向和  $y$  方向的光束重心位置。 $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  描述了靶面上光斑的偏移程度,  $|\bar{x}|$  和  $|\bar{y}|$  越大,表明光束的偏移越大。

### 2) 峰值 Strehl 比

$$S_r = \frac{I_{\max}}{I_{0\max}}, \quad (4)$$

式中:  $I_{\max}$  和  $I_{0\max}$  分别为热晕和自由空间中的光强峰值。  $S_r$  越大,表明峰值光强受热晕的影响越小。

3) 二阶矩束宽

$$\begin{cases} \omega_x^2 = \frac{4 \iint (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \\ \omega_y^2 = \frac{4 \iint (y - \bar{y})^2 I(x, y, z) dx dy}{\iint I(x, y, z) dx dy} \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $\omega_x$  和  $\omega_y$  分别为沿  $x$  方向和  $y$  方向二阶矩束宽, 用来描述光斑的大小。

4) 传输效率

$$\eta = \frac{\iint_{\sigma} I(x, y, z) dx dy}{\iint_{\sigma} I(x, y, 0) dx dy}, \quad (6)$$

式中  $\sigma = 100 \text{ cm}^2$ 。该参数描述的是靶面上以光束重心为圆心且面积为  $100 \text{ cm}^2$  的圆中包含的光束能量与源平面加光阑后总能量之比。

3 数值模拟结果及分析

将一个焦距为  $z_f$  的聚焦透镜放置于源平面上, 并且每束子光束都被圆形光阑截断。子孔径填充因子  $f_s$  取  $0.89^{[23]}$ , 该填充因子可以使列阵高斯光束在自由空间传输时靶面上的峰值光强和传输效率达到

最大。图 2 所示为源平面上束平顶光束在不同阶数  $N$  时的一维光强分布。由图 2 可知, 子孔径内基本包含了子光束的平顶部分。本研究采用的数值模拟参数如下: 扰动前的大气折射率  $n_0 = 1.000313$ , 比热容比  $\gamma = 1.4$ , 声速  $c_s = 340 \text{ m/s}$ , 标准大气密度  $\rho_0 = 1.302461 \text{ kg/m}^3$ , 风速  $v = 5 \text{ m/s}$  (沿  $x$  轴正向),  $\lambda = 1.064 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $\alpha \approx 6 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ,  $\omega_0 = 4.45 \text{ cm}$ ,  $P = 10 \text{ kW}$ ,  $z = z_f = 3 \text{ km}$ 。

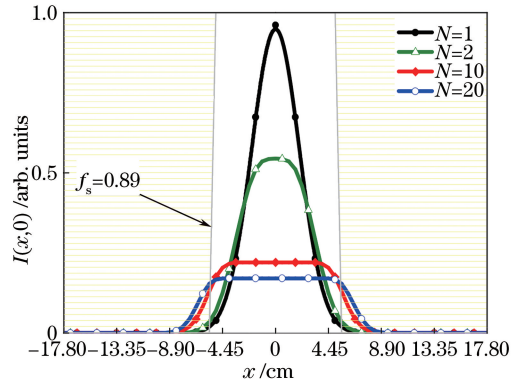


图 2 一束平顶光束在源平面上  $x$  方向的光强分布  
Fig. 2 Intensity distributions in  $x$  direction of a flat-topped beam at source plane

图 3 和图 4 所示分别为相干合成和非相干合成列阵平顶光束在靶面上的光强分布。由图 3 可知,

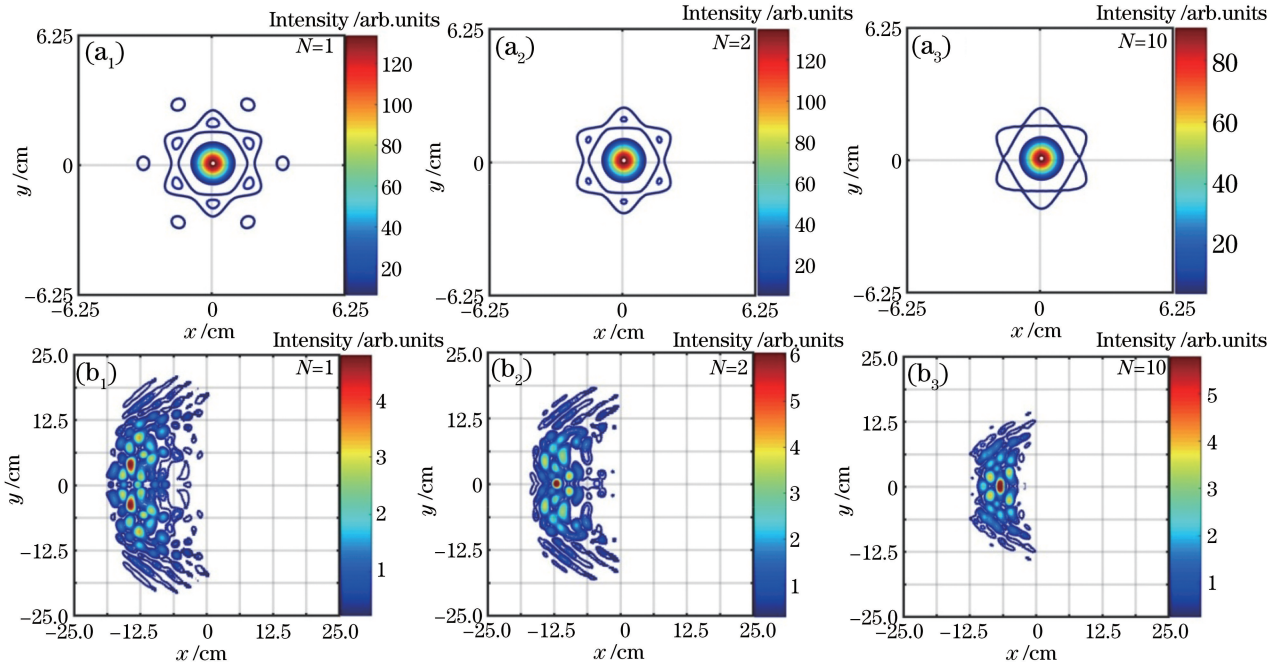


图 3 相干合成列阵平顶光束在靶面上的光强分布。(a<sub>1</sub>)自由空间,  $N=1$ ; (a<sub>2</sub>)自由空间,  $N=2$ ; (a<sub>3</sub>)自由空间,  $N=10$ ; (b<sub>1</sub>)大气中,  $N=1$ ; (b<sub>2</sub>)大气中,  $N=2$ ; (b<sub>3</sub>)大气中,  $N=10$

Fig. 3 Intensity distributions of flat-topped laser beam array for coherent beam combination at target plane. (a<sub>1</sub>) In free space,  $N=1$ ; (a<sub>2</sub>) in free space,  $N=2$ ; (a<sub>3</sub>) in free space,  $N=10$ ; (b<sub>1</sub>) in atmosphere,  $N=1$ ; (b<sub>2</sub>) in atmosphere,  $N=2$ ; (b<sub>3</sub>) in atmosphere,  $N=10$

在自由空间中传输时,相干合成的列阵平顶光束的光斑存在一个主瓣和若干个旁瓣,并且旁瓣随着  $N$  的增大而逐渐消失,即列阵高斯光束( $N=1$ )的旁瓣最多。在大气中传输时,横向风的存在使得相干合成的列阵平顶光束的光斑呈月牙状,并且出现了多个光强峰值;同时,随着  $N$  增大,光强峰值的个数逐

渐减少。

由图 4 可知,非相干合成的列阵平顶光束无论是在自由空间中传输,还是在大气中传输,光斑内始终保持一个峰值。随着  $N$  增大,非相干合成的列阵平顶光束在自由空间中的光斑均呈类高斯分布,而在大气中传输时,月牙形的光斑会发生变化。

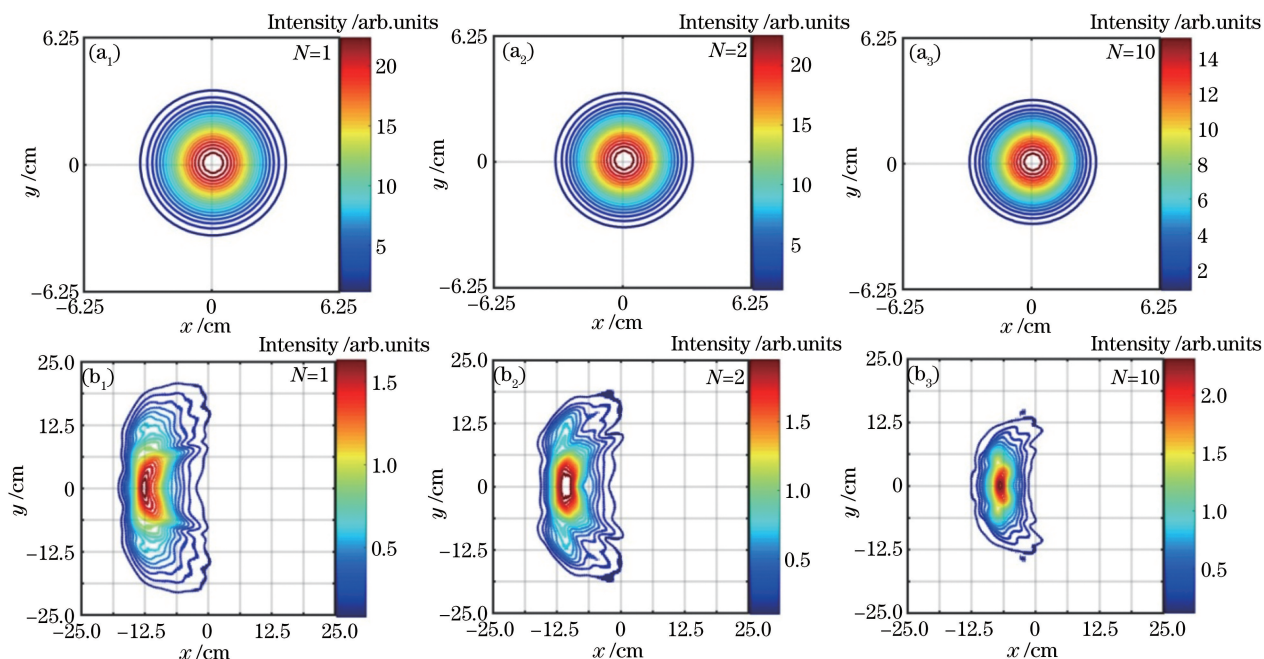


图 4 非相干合成列阵平顶光束在靶面上的光强分布。(a<sub>1</sub>)自由空间,  $N=1$ ;(a<sub>2</sub>)自由空间,  $N=2$ ;(a<sub>3</sub>)自由空间,  $N=10$ ;  
(b<sub>1</sub>)大气中,  $N=1$ ;(b<sub>2</sub>)大气中,  $N=2$ ;(b<sub>3</sub>)大气中,  $N=10$

Fig. 4 Intensity distributions of flat-topped laser beam array for incoherent beam combination at target plane. (a<sub>1</sub>) In free space,  $N=1$ ; (a<sub>2</sub>) in free space,  $N=2$ ; (a<sub>3</sub>) in free space,  $N=10$ ; (b<sub>1</sub>) in atmosphere,  $N=1$ ; (b<sub>2</sub>) in atmosphere,  $N=2$ ; (b<sub>3</sub>) in atmosphere,  $N=10$

图 5 和图 6 所示分别为列阵平顶光束的光束重心  $\bar{x}$  和峰值 Strehl 比  $S_r$  随光束阶数  $N$  的变化。由图 5 可知,列阵平顶光束的光束重心的绝对值  $|\bar{x}|$  随着  $N$  的增大而单调减小。这表明在大气中

传输时,阶数越大的列阵平顶光束的偏移越小,受热晕的影响越小。相对于列阵平顶光束( $N>1$ ),列阵高斯光束( $N=1$ )受热晕的影响最严重。原因是平顶光束能量分布更均匀,形成的折射率梯度更小,进而光束的畸变更小。由图 6 可知,峰值 Strehl 比  $S_r$  随着  $N$  的增大而增大,并且非相干合成列阵平顶光束的  $S_r$  始终明显大于相干合成的。这说明,相对于列阵平顶光束的相干合成,非相干合成受热晕的影响较小。

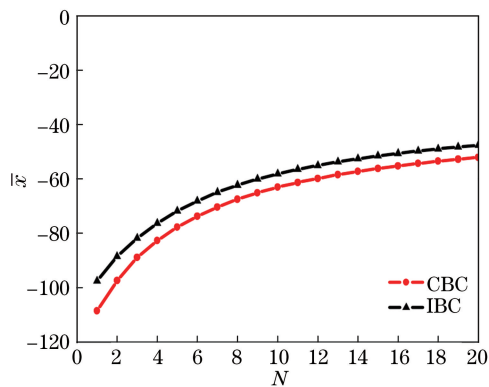


图 5 光束重心  $\bar{x}$  随光束阶数  $N$  的变化

Fig. 5 Variation of beam center of gravity  $\bar{x}$  with beam order  $N$

列阵平顶光束的束宽随阶数  $N$  的变化如图 7 所示。由图 7 可知:在自由空间中,无论是相干合成的列阵平顶光束,还是非相干合成的列阵平顶光束,其束宽  $w_{free}$  都随着  $N$  的增大而增大,即自由空间中高斯列阵光束的束宽最小;热晕效应会使光束扩展,大气中的二阶矩束宽  $w_x$  和  $w_y$  均大于  $w_{free}$ ;随着  $N$  增大,  $w_x$  几乎不变,  $w_y$  逐渐减小。此时,大气中列阵平顶光束的束宽小于列阵高斯光束的束宽。

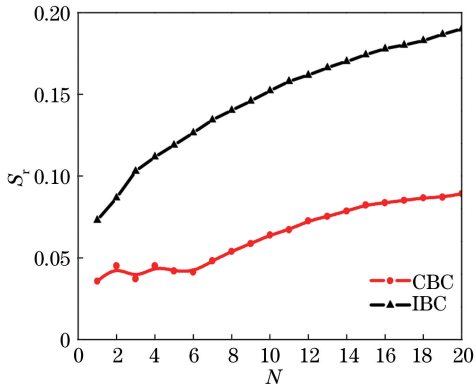


图 6 峰值 Strehl 比  $S_r$  随光束阶数  $N$  的变化

Fig. 6 Variation of peak Strehl ratio  $S_r$  with beam order  $N$

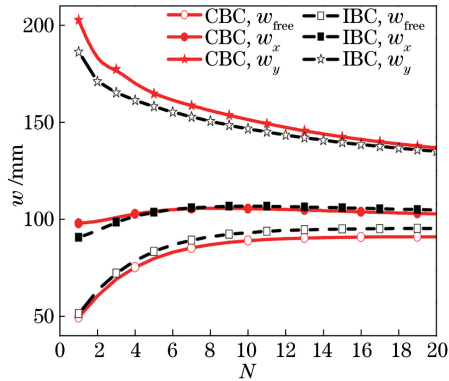


图 7 光束束宽  $w$  随光束阶数  $N$  的变化

Fig. 7 Variation of beam width  $w$  with beam order  $N$

图 8 所示为列阵平顶光束的传输效率  $\eta$  随光束阶数  $N$  的变化。由图 8 可知,在自由空间中,列阵平顶光束的传输效率  $\eta$  随着  $N$  的增大而减小,即自由空间中高斯列阵光束的传输效率最大。这是因为在自由空间中,随着  $N$  增大,束宽增大,能量集中度降低,从而使得截面积为  $100 \text{ cm}^2$  的圆桶包含的能量减小。在大气中,热晕效应的影响使得列阵平顶光束的传输效率  $\eta$  随着  $N$  的增大而增大,即相同功

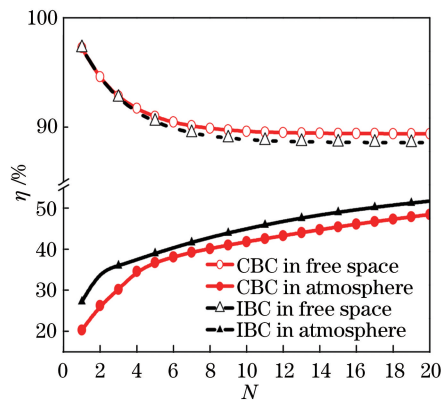


图 8 传输效率  $\eta$  随光束阶数  $N$  变化

Fig. 8 Variation of propagation efficiency  $\eta$  with beam order  $N$

率下,大气中列阵平顶光束的传输效率优于列阵高斯光束的传输效率。

## 4 结 论

本课题组利用自行编制的含时四维仿真程序研究了热晕效应对相干合成和非相干合成列阵平顶光束在大气中传输的影响。研究表明:列阵平顶光束在大气中传输且存在横向风时,光斑呈月牙状。相干合成时,光斑内存在多个光强峰值,并且随着平顶光束阶数  $N$  的增大,光强峰值的个数逐渐减少;非相干合成时,光斑内始终保持一个峰值。相对于列阵平顶光束的相干合成,非相干合成受热晕的影响较小。光束阶数  $N$  越大的列阵平顶光束的偏移越小,峰值 Strehl 比越大,这说明热晕对阶数  $N$  越大的列阵平顶光束的影响越小,即相对于列阵平顶光束,大气中列阵高斯光束 ( $N=1$ ) 受热晕的影响更严重。在自由空间中,束宽  $w_{\text{free}}$  随着  $N$  的增大而增大。在大气中传输且热晕效应较大时,由于存在沿  $x$  轴正向的风,因此束宽  $w_y$  随着  $N$  的增大而逐渐减小。光束传输效率在自由空间中随着  $N$  的增大而减小,但是在大气中则随着  $N$  的增大而增大。相同功率时,大气中列阵平顶光束的传输效率优于列阵高斯光束的传输效率。本研究所得结果对高能激光在大气中传输的研究具有实际意义。

## 参 考 文 献

- [1] Andrews J R, Schuster G L. High-power and high-spatial-coherence broad-area power amplifier [J]. Optics Letters, 1991, 16(12): 913-915.
- [2] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, *et al.* High-power lasers for directed-energy applications [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F201-F209.
- [3] Wang Y J, Fan C Y, Wei H L. Laser beam propagation and applications through the atmosphere and seawater[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.  
王英俭, 范承玉, 魏合理. 激光在大气和海水中传输及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [4] Brignon A. Coherent laser beam combining [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- [5] Lü B D, Ma H. Coherent and incoherent combinations of off-axis Gaussian beams with rectangular symmetry [J]. Optics Communications, 1999, 171(4/5/6): 185-194.
- [6] Ji X L, Li X Q. The far-field divergence angle and the far-field radiant intensity distribution of Gaussian Schell-model array beams [J]. Acta Physica Sinica,

- 2009, 58(7): 4624-4629.  
季小玲, 李晓庆. 高斯-谢尔模型列阵光束的远场发散角和远场辐射强度[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4624-4629.
- [7] Lü B D, Ma H. Coherent and incoherent off-axis Hermite-Gaussian beam combinations [J]. Applied Optics, 2000, 39(8): 1279-1289.
- [8] Ren Z J, Wu Q, Shi Y L, *et al.* Production of accelerating quad Airy beams and their optical characteristics[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 15154-15164.
- [9] Mao Y H, Mei Z R, Gu J G. Propagation of Gaussian Schell-model Array beams in free space and atmospheric turbulence [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 86: 14-20.
- [10] Li X Q, Ji X L. Directionality of partially coherent Hermite-Gaussian array beams propagating in atmospheric turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3241-3247.  
李晓庆, 季小玲. 部分相干厄米-高斯列阵光束通过湍流大气传输的方向性[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3241-3247.
- [11] Rao R Z, Li Y J. Light propagation through non-Kolmogorov-type atmospheric turbulence and its effects on optical engineering[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501003.  
饶瑞中, 李玉杰. 非 Kolmogorov 大气湍流中的光传播及其对光电工程的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501003.
- [12] Gu Y L, Gbur G. Scintillation of Airy beam arrays in atmospheric turbulence[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3456-3458.
- [13] Lu L, Wang Z Q, Zhang J H, *et al.* Average intensity of  $M \times N$  Gaussian array beams in oceanic turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7500-7507.
- [14] Gebhardt F, Smith D. Self-induced thermal distortion in the near field for a laser beam in a moving medium [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1971, 7(2): 63-73.
- [15] Chen D Q, Li Y K, Xu X S, *et al.* Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1993, 5(2): 243-252.  
陈栋泉, 李有宽, 徐锡申, 等. 激光大气传输中热晕的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1993, 5(2): 243-252.
- [16] Li X Q, Ji X L. Effect of thermal blooming on the beam quality of truncated laser beams [J]. Optik, 2016, 127(20): 8350-8356.
- [17] Gori F. Flattened Gaussian beams[J]. Optics Communications, 1994, 107(5/6): 335-341.
- [18] Lü B D, Luo S R. Generalized  $M^2$  factor of hard-edged diffracted flattened Gaussian beams [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(9): 2098-2101.
- [19] Ji X L, Zhang T, Chen X W, *et al.* Spectral properties of flat-topped beams propagating through atmospheric turbulence [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 12-16.  
季小玲, 张涛, 陈晓文, 等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 12-16.
- [20] Yuan Y S, Cai Y J, Eyyuboglu H T, *et al.* Propagation factor of partially coherent flat-topped beam array in free space and turbulent atmosphere [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(5): 752-759.
- [21] Zhang Y Q, Ji X L, Li X Q, *et al.* Self-focusing effect of annular beams propagating in the atmosphere [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21329-21341.
- [22] Fleck J A, Jr, Morris J R, Feit M D. Time-dependent propagation of high-energy laser beams through the atmosphere: II [J]. Applied Physics, 1977, 14(1): 99-115.
- [23] Vorontsov M A, Lachinova S L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(8): 1949-1959.