

强激光上行大气传输热晕效应导致的光束偏折研究

张建柱 张飞舟 苏华 胡鹏 谢晓钢 罗文

**Analysis of beam deviation induced by thermal blooming effect when high-energy laser propagating up in atmosphere**

Zhang Jian-Zhu Zhang Fei-Zhou Su Hua Hu Peng Xie Xiao-Gang Luo Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 244202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211138

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211138>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 强激光上行大气传输热晕效应导致的光束偏折研究

张建柱 张飞舟 苏华 胡鹏 谢晓钢 罗文†

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2021年6月16日收到; 2021年7月30日收到修改稿)

从激光大气传输热晕效应理论出发, 提出了热畸变参数矢量模型概念, 基于热畸变参数矢量模型, 通过激光系统仿真软件 EasyLaser, 对激光上行远距离大气传输场景下光束偏折大小、偏折方向随矢量热畸变参数的变化规律进行了研究, 结果表明, 采用热晕效应热畸变参数矢量模型, 光束偏折大小与矢量热畸变参数的模呈近线性增长, 偏折方向与矢量热畸变参数的方向相反. 基于光束偏折与矢量热畸变参数的规律, 通过对光束传输路径上大气环境参数进行准实时测量, 可为激光系统实际应用中光束偏置的预评估提供手段.

**关键词:** 热晕效应, 光束偏折, 热畸变参数, 矢量模型

**PACS:** 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

**DOI:** 10.7498/aps.70.20211138

## 1 引言

激光大气传输时, 大气热晕效应会导致光束扩展和偏折. 精确掌握光束扩展和偏折与热晕效应强弱的规律关系, 对激光系统的实际工程应用至关重要.

围绕大气热晕效应的影响, 国内外学者已开展了大量的理论与实验研究<sup>[1-14]</sup>, Gebhardt<sup>[3]</sup>系统地分析总结了光束准直传输与聚焦传输场景下热晕效应导致的波前和光强畸变, 给出了远场光斑偏移、光斑强度变化等与热晕效应强弱的关系. 通过数值模拟, Zhang 和 Li<sup>[4]</sup>对热晕效应的定标规律进行了研究, 黄印博等<sup>[5]</sup>针对3种不同发射口径, 开展了强激光水平准直传输时稳态热晕自适应光学校正的仿真研究, 对聚焦光束大气传输时光束扩展的定标规律进行了研究<sup>[6]</sup>. 乔春红等<sup>[7]</sup>对激光大气传输时热晕效应及其相位补偿开展了仿真实验研究. 张鹏飞等<sup>[8]</sup>对聚焦光束热晕效应的相位补偿的定标规律进行了研究; 针对序列长脉冲激光, 提出了衡量热晕效应强度的热畸变参数, 研究给出了

序列长脉冲激光热晕效应的定标规律<sup>[9]</sup>. 吴书云等<sup>[10]</sup>针对高斯、平顶、平顶环形光束, 开展了激光均匀大气传输时稳态热晕效应的研究. 陈小威等<sup>[11]</sup>针对准直光束上行传输稳态热晕, 开展了全局敏感性分析. 李晓庆等<sup>[12]</sup>针对相干合成和非相干合成阵列平顶光束大气传输, 开展了热晕效应影响的研究. 闫伟等<sup>[13]</sup>基于相关波前探测算法对热晕效应校正进行了数值模拟研究.

大气热晕效应强弱通常采用 Bradley-Herrmann 的热畸变参数  $N_D$  描述<sup>[14]</sup>:

$$N_D = 2\sqrt{2}k \int_0^L \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \times \frac{P(z) \cdot \alpha_a(z) \cdot \exp \left[ - \int_0^z dz' \alpha_t(z') \right]}{\rho(z) C_p R(z) V(z)} dz, \quad (1)$$

式中,  $k$  是波数,  $P$  是激光功率,  $R$  是激光束半径,  $|\partial n / \partial T|$  为大气折射率梯度,  $\alpha_a$  是大气吸收系数,  $\alpha_t$  是大气消光系数,  $L$  是传输距离,  $\rho$  是大气密度,  $C_p$  是大气定压比容,  $V$  是垂直于光束传输的横向风速. 由 (1) 式可以看出热畸变参数  $N_D$  是传输路

† 通信作者. E-mail: [luo\\_wen@iapcm.ac.cn](mailto:luo_wen@iapcm.ac.cn)

径上光束强度分布、大气吸收、大气消光、横向风速等相关物理量的积分量。

已报道的研究成果中,通常把热畸变参数  $N_D$  当作标量处理,即仅考虑光束传输通道上不同位置的风速变化,而忽略风向变化.激光系统实际应用场景中,传输光路上风向通常是非同向的,因此单纯基于已有标量理论模型评估热晕效应对光束传输特性影响时,会存在一定评估误差,特别是针对光束偏折的评估,严重情况下可能造成评估不正确,因此需对模型进行修正.如图 1 所示,设光束沿  $Z$  轴传输,传输通道介质分为两层,第 1 层横向风速  $V_1$  对应热畸变参数  $N_{D1}$ ,导致光束偏折  $\theta_1$ ,第 2 层横向风速  $V_2$  对应热畸变参数  $N_{D2}$ ,导致光束偏折为  $\theta_2$ .若采用标量叠加评估,则光轴综合偏折  $\theta_1 + \theta_2$ ,若采用矢量叠加评估,则光轴综合偏折  $\theta_1 - \theta_2$ ,标量模型造成评估错误.

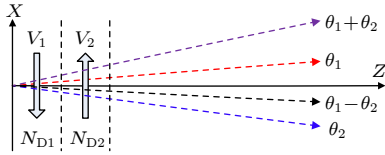


图 1 标量叠加与矢量叠加差异示意图

Fig. 1. Sketch map of difference between vector add and scalar add.

本文提出了热畸变参数  $N_D$  的矢量模型概念,并基于热畸变参数矢量模型,通过激光系统仿真软件 EasyLaser<sup>[15]</sup>,仿真研究了激光斜上行远距离传输场景下光束偏折大小、方向随矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律.研究结果可为激光系统实际应用中瞄准偏差的预评估提供手段.

## 2 热畸变参数矢量模型

研究连续激光大气传输时热晕效应的基本方程是傍轴近似下的 Helmholtz 方程和等压近似下的温度变化流体力学方程.若沿光束传输路径横向风  $V$  的方向恒定,假定沿  $X$  轴方向,忽略衍射效应时,可得稳态热晕效应的畸变波面为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} \varphi_B(x, y) &= - \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \frac{k}{\rho_0 C_p} \int_0^L \frac{\alpha_a(z) \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right]}{V_x(z)} dz \\ &\quad \times \int_{-\infty}^x I_0(x', y) dx', \end{aligned} \quad (2)$$

式中,光束沿  $z$  方向传输,  $\rho_0$  为未扰动的大气密度,  $C_p$  为定压比热,  $V_x$  为横向风速,  $\alpha_t$  为大气总消光系数,  $I_0$  为初始激光强度分布.若沿光束传输路径横向风的方向不固定,则需联合求解 (3) 式获得稳态热晕效应的畸变波面变:

$$\begin{cases} \varphi_B(x, y) = - \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \frac{k}{\rho_0 C_p} \int_0^L \alpha_a(z) \\ \quad \times \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right] U(x, y, z) dz, \\ \left\{ [\hat{x} V_x(z) + \hat{y} V_y(z)] \cdot \left[ \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \right] \right\} U(x, y, z) \\ = I_0(x, y), \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$  分别表示垂直于光束传输方向的两个正交单位矢量.

### 2.1 横向风向固定

针对均匀平台分布的激光束,即  $I_0 = P/(\pi R^2)$ ,  $R$  为光斑半径,  $P$  为激光束发射总功率,简化 (2) 式得传输路径横向风向恒定条件下热晕效应畸变波面:

$$\begin{aligned} \varphi_B(x, y) &= - \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \frac{k}{\rho_0 C_p} \frac{P}{\pi R^2} \int_0^L \frac{\alpha_a(z) \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right]}{V_x(z)} dz \\ &\quad \times \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^x dx' \\ &= - \frac{\Delta \varphi_U}{2} \left[ (x/R) + (1 - y^2/R^2)^{1/2} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta \varphi_U = N_D / (\sqrt{2\pi}),$$

$$N_D = \frac{4\sqrt{2}kP}{\rho_0 C_p D} \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|$$

$$\times \int_0^L \frac{\alpha_a(z) \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right]}{V_x(z)} dz, \quad (5)$$

式中,  $\Delta \varphi_U$  表示光束在横向风方向的最大相移.针对中心遮拦比为  $\epsilon$  的平台光束,热畸变波面导致的光束偏折角  $\theta$  近似为

$$\theta \approx \frac{\Delta \varphi_U \lambda}{2\pi D} \approx \frac{1}{2\sqrt{2}\pi^2} \frac{N_D \lambda}{D(1 - \epsilon^2)}. \quad (6)$$

### 2.2 横向风向不固定

针对均匀平台分布的激光束,求解 (3) 式可得

横向风向不固定条件下热晕效应畸变波面:

$$\begin{aligned} & \varphi_B(x, y) \\ &= - \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \frac{k}{\rho_0 C_p} \frac{P}{\pi R^2} \int_0^L \frac{\alpha_a(z) \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right]}{V(z)} dz \\ & \quad \times \int_{-\sqrt{R^2-r^2}}^r \hat{V}_z \cdot \hat{r} dr' \\ & \approx - \frac{\Delta\phi_U}{2} \cdot \hat{r} \left[ \frac{r}{R} + \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{1/2} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_U &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} N_D, \\ N_D &= \frac{4\sqrt{2}kP}{\rho_0 C_p D} \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \int_0^L \alpha_a(z) \\ & \quad \times \exp \left[ - \int_0^z \alpha_t(z') dz' \right] \frac{\hat{V}_z}{|V(z)|} dz, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\hat{V}_z$  为传输路径  $z$  处横向风速方向的单位矢量,  $\hat{r}$  为传输光路横截面内单位位置矢量,  $r_{\perp}$  与  $\hat{r}$  垂直.  $\Delta\phi_U$  表示光束横向最大相移矢量,  $N_D$  是矢量热畸变参数. 针对中心遮拦比为  $\varepsilon$  的平台光束, 热畸变波面导致的光束偏折角  $\theta$  的大小近似为

$$\theta \approx \frac{\lambda}{2\pi D} |\Delta\phi_U| \approx \frac{1}{2\sqrt{2}\pi^2} \frac{\lambda}{D(1-\varepsilon^2)} |N_D|. \quad (9)$$

偏振方向为  $N_D$  反方向.

强激光大气传输实际应用场景中, 光束传输通道上大气介质的密度、吸收、消光、风速风向等物理特性是非均匀分布的. 常规处理方法是对大气介质进行分层处理, 并假设每个分层段上大气介质物理特性呈均匀分布, 因此每层大气介质的热畸变参数为

$$N_{D,i} = \frac{4\sqrt{2}k\alpha_{a,i}P_i\Delta z_i}{\rho_i C_p |V_i| D_i} \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|_i e^{-\sum_{j=1}^i \alpha_{t,j}\Delta z_j} \hat{V}_i, \quad (10)$$

式中下标  $i$  或  $j$  表示大气介质的第  $i$  个或  $j$  个分层,  $\Delta z$  表示大气分层厚度,  $\hat{V}_i$  为风速方向的单位矢量.

若忽略不同分层段之间风向的差异, 即把热畸变参数当做标量处理有

$$N_D = \sum_{i=1}^{nLayer} |N_{D,i}|. \quad (11)$$

若考虑不同分层段之间风向的差异, 即把热畸变参数当做矢量处理有

$$\begin{aligned} N_D &= \sum_{i=1}^{nLayer} N_{D,i} = \hat{x} \sum_{i=1}^{nLayer} |N_{D,i}| \frac{V_{i,x}}{V_i} \\ & \quad + \hat{y} \sum_{i=1}^{nLayer} |N_{D,i}| \frac{V_{i,y}}{V_i}, \\ V_i &= \sqrt{V_{i,x}^2 + V_{i,y}^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $V_{i,x}$  和  $V_{i,y}$  表示第  $i$  层分段上横向风在  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$  上的投影分量. 对比 (11) 式和 (12) 式可知, 由于矢量处理和标量处理两种方式下获得的光束传输路径上总的热畸变参数的大小不同, 即  $N_D \neq |N_D|$ , 因此热畸变波面导致的光束偏折角也不同.

### 3 斜上行场景下光束偏折与热畸变参数规律

基于大气热晕效应理论模型和仿真软件<sup>[1,2,15,16]</sup>, 对斜上行远距离传输场景下激光束大气传输时光束偏折与热畸变参数  $N_D$  的规律进行仿真研究, 旨在获得典型场景下光束偏折角与热畸变参数  $N_D$  的变化规律, 为激光系统瞄准偏置的设置提供手段.

#### 3.1 仿真参数

仿真计算时, 强激光束传输仰角约  $40^\circ$ , 方位角约  $180^\circ$ , 即正南方向. 大气吸收系数、消光系数、自然风速、风向廓线采用典型值, 如图 2 所示, 大气吸收和消光主要集中在近地面约 2 km 以下, 即热晕效应也主要集中在近地面约 2 km 以下. 强激光束传输距离远大于大气层厚度, 即相对传输距离, 热晕效应相差可近似为近场相差. 设强激光束波面理想, 强度分布呈平台或环形, 仅考虑热晕效应影响. 通过调节发射总功率  $P$ 、发射口径  $D$  等获得不同热晕效应强度, 即不同热畸变参数  $N_D$ .

#### 3.2 热畸变参数标量模型与矢量模型对比

取激光发射口径  $D = 0.9$  m, 实心平台理想光束, 传输路径风廓线如图 2(b) 中的廓线 A、廓线 B 或同风向廓线 ( $270^\circ$ ), 调节发射总功率  $P$  获得不同强度热晕效应. 图 3 是热畸变参数标量值  $N_D$  相同但矢量分布  $N_D$  不同时远场光斑典型分布. 由图 3 看出, 3 种条件下虽然热畸变参数标量值相同, 但由于其矢量分布不同, 远场光斑偏移差别较大.

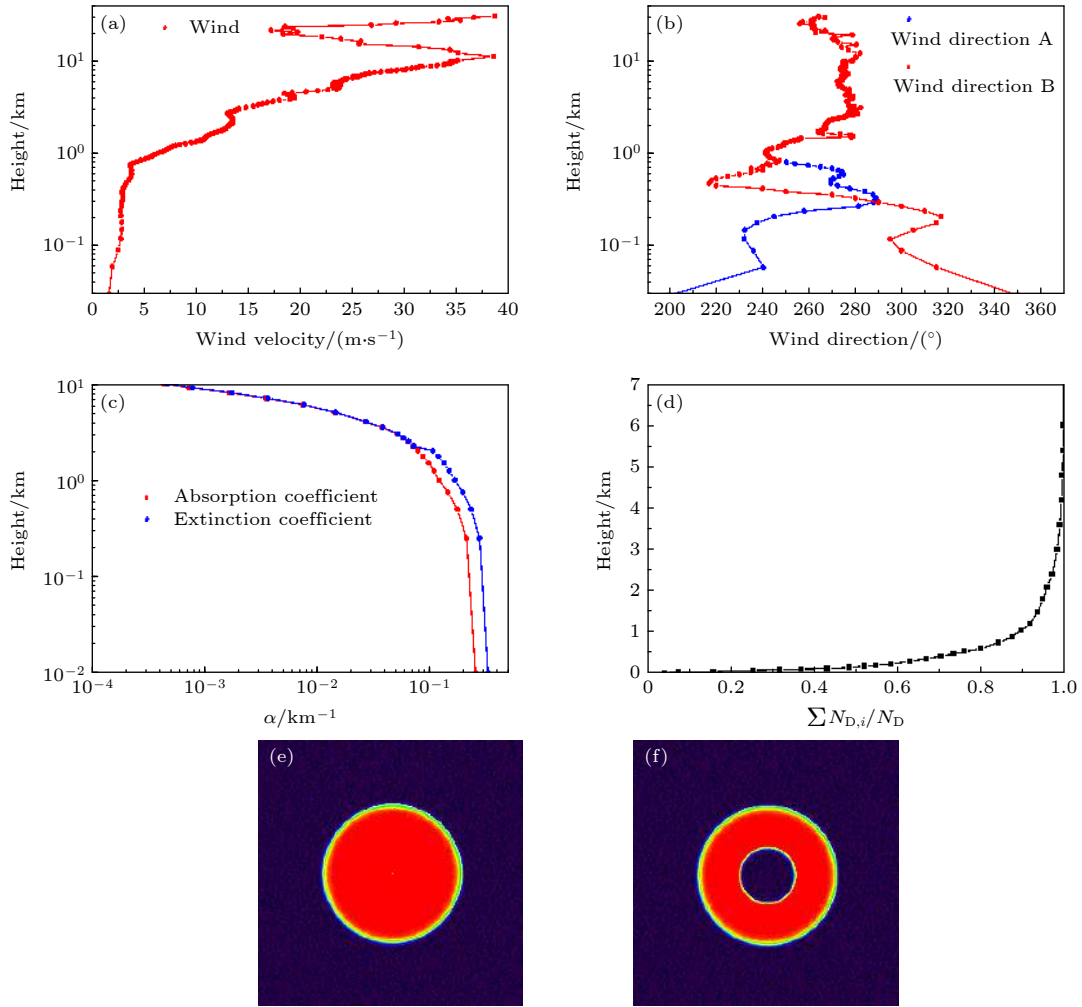


图 2 仿真参数 (a) 自然风速廓线; (b) 自然风向廓线; (c) 大气吸收与消光廓线; (d) 热晕效应分布; (e) 实心平台光束; (f) 遮挡比  $\varepsilon = 0.4$  的环形光束

Fig. 2. Simulation parameter: (a) Wind velocity outline; (b) wind direction outline; (c) atmospheric absorption and extinction outline; (d) thermal blooming effect distribution; (e) flat circular beam; (f) hollow circle beam of obstructed ratio  $\varepsilon = 0.4$ .

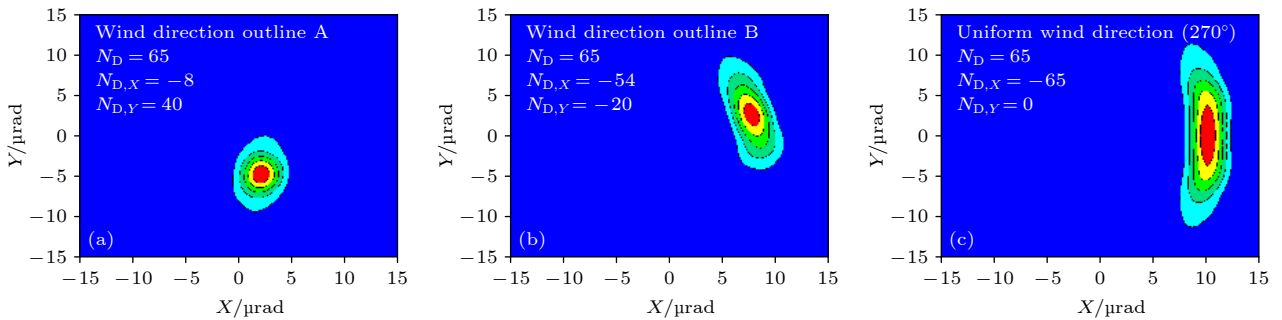


图 3 热畸变参数标量值相同但矢量分布不同时远场光斑典型分布 (a) 风向廓线 A; (b) 风向廓线 B; (c) 同风向  $270^\circ$

Fig. 3. Typical far field distribution of the same thermal blooming distortion parameter  $N_D$  but different  $N_D$ : (a) Wind direction outline A; (b) wind direction outline B; (c) uniform wind direction ( $270^\circ$ ).

图 4 是热晕导致的远场光斑质心偏移随热畸变参数的变化关系, 图 4(a) 横坐标是标量热畸变参数  $N_D$ , 图 4(b) 横坐标是热畸变参数  $N_D$  的模. 由于标量热畸变参数模型中未考虑传输路径风向的

影响, 因此热畸变参数标量值相同但风向不同时, 远场光斑质心偏移差别较大. 矢量热畸变参数模型中由于考虑了传输路径风向的影响, 因此远场光斑质心偏移随矢量热畸变参数  $N_D$  的模线性增长.

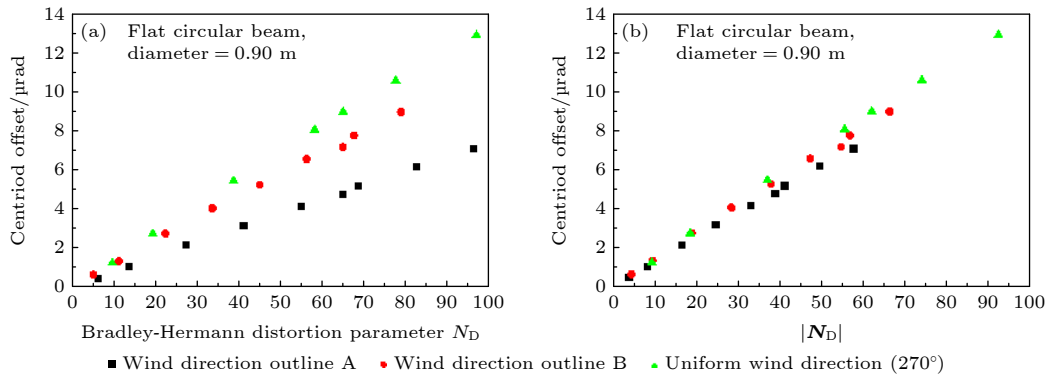


图 4 远场质心偏移与热畸变参数的关系 (a) 标量热畸变参数模型; (b) 矢量热畸变参数模型

Fig. 4. Relation between centroid offset of flat circular beam and thermal blooming distortion parameter: (a) Thermal blooming distortion parameter scalar model; (b) thermal blooming distortion parameter vector model.

### 3.3 考虑传输路径随机风向的光束偏折随热畸变参数 $N_D$ 的变化规律

激光系统实际应用场景下, 传输路径上自然风速风向是随机变化的. 取激光发射口径  $D = 0.9 \text{ m}$ , 平台光束或中心遮拦比  $\varepsilon = 0.4$  的环形光束, 光束传输路径自然风速和风向、大气吸收及消光特性如图 2 所示, 通过对不同距离处自然风向  $V_d$  加载随机扰动, 并调节发射功率  $P$ , 获得不同的热晕效应, 评估远场光斑质心偏移与热畸变参数  $N_D$  的规律关系. 仿真分析时自然风向  $V_d$  随机扰动的 RMS 值约  $5^\circ\text{--}30^\circ$ .

图 5 和图 6 是平台光束远场光斑质心偏移随矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律. 图 5 仿真计算时取自然风向廓线 A, 图 6 仿真计算时取自然风向廓线 B. 图中黑线是理论公式 (9) 的计算结果, 离散点表示不同发射功率和自然风向  $V_d$  随机扰动时的模拟结果. 由图 5 和图 6 可看出: 针对光束传输路径自然风速风向随机变化的非均匀分布, 采用热畸

变参数矢量模型, 远场光斑质心偏移与矢量热畸变参数  $N_D$  模的大小呈近线性增长, 质心偏移方向与矢量热畸变参数  $N_D$  的方向相反. 质心偏移模拟值与理论值的偏差的 RMS 值约小于  $0.2 \text{ } \mu\text{rad}$ .

图 7 和图 8 是中心遮拦比  $\varepsilon = 0.4$  的环形光束远场光斑质心偏移随矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律. 图 7 仿真计算时取自然风向廓线 A, 图 8 仿真计算时取自然风向廓线 B. 图中黑线是基于 (9) 式的计算结果, 离散点表示不同发射功率和自然风向  $V_d$  随机扰动时的仿真计算结果. 图 7 和图 8 所得结论与图 5 和图 6 相同. 质心偏移模拟值与理论值的偏差的 RMS 值约小于  $0.3 \text{ } \mu\text{rad}$ .

图 5—8 结果表明, 激光系统实际应用时, 基于热晕效应热畸变参数矢量模型, 若能对传输路径自然风速、自然风向、大气吸收、大气消光等环境参数进行实时测量, 则可对远场光斑质心偏移做出准确预估, 为激光系统瞄准偏置的设置提供快速评估手段.

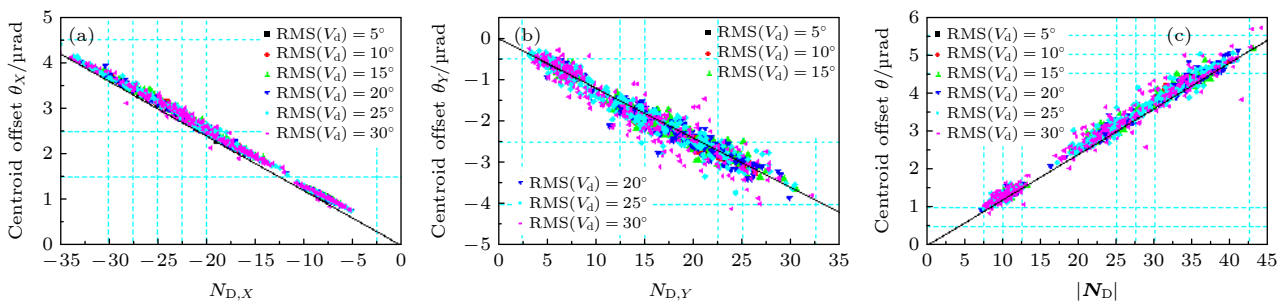


图 5 自然风向廓线 A 条件下平台光束光束偏折与矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律 (a) X 方向质心偏移; (b) Y 方向质心偏移; (c) 质心总偏移

Fig. 5. Relation between centroid offset of flat circular beam and thermal blooming parameter  $N_D$  while wind direction outline A is used: (a) Centroid offset in X axis; (b) centroid offset in Y axis; (c) all centroid offset.

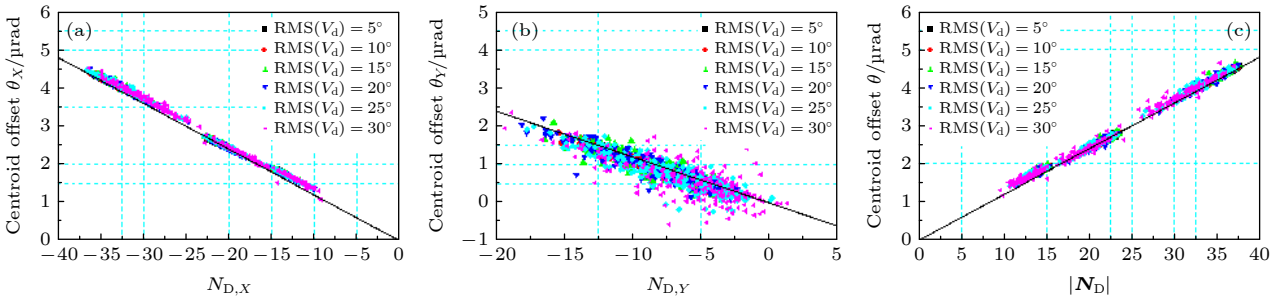


图 6 自然风向廓线 B 条件下平台光束光束偏折与矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律 (a) X 方向质心偏移; (b) Y 方向质心偏移; (c) 质心总偏移

Fig. 6. Relation between centroid offset of flat circular beam and thermal blooming parameter  $N_D$  while wind direction outline B is used: (a) Centroid offset in X axis; (b) centroid offset in Y axis; (c) all centroid offset.

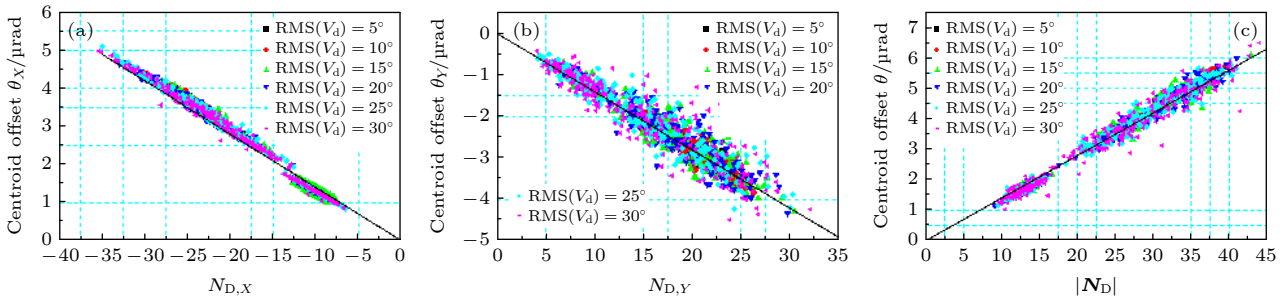


图 7 自然风向廓线 A 条件下环形光束光束偏折与矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律 (a) X 方向质心偏移; (b) Y 方向质心偏移; (c) 质心总偏移

Fig. 7. Relation between centroid offset of hollow circle beam and thermal blooming parameter  $N_D$  while wind direction outline A is used: (a) Centroid offset in X axis; (b) centroid offset in Y axis; (c) all centroid offset.

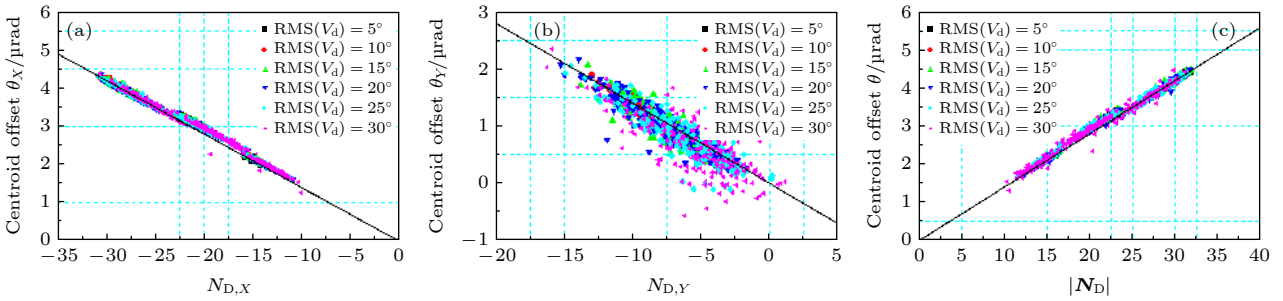


图 8 自然风向廓线 B 条件下环形光束光束偏折与矢量热畸变参数  $N_D$  的变化规律 (a) X 方向质心偏移; (b) Y 方向质心偏移; (c) 质心总偏移

Fig. 8. Relation between centroid offset of hollow circle beam and thermal blooming parameter  $N_D$  while wind direction outline B is used: (a) Centroid offset in X axis; (b) centroid offset in Y axis; (c) all centroid offset.

## 4 结 论

强激光系统实际应用中, 传输光路上自然风风速风向通常呈非均匀分布, 已有大气热晕效应热畸变参数  $N_D$  标量模型已无法对热致光束偏折进行准确评估. 本文从强激光大气传输热晕效应理论出发, 提出了热畸变参数矢量模型概念, 并基于激光系统仿真软件 EasyLaser, 对强激光斜上行远距离传输场景下光束偏折大小、偏折方向与矢量热畸变参数

$N_D$  的定标规律进行了仿真研究. 研究结果表明: 采用热畸变参数矢量模型, 则光束偏折大小与矢量热畸变参数  $N_D$  模的大小呈近线性关系, 光束偏折方向与矢量热畸变参数  $N_D$  的方向相反. 基于热畸变参数矢量模型, 通过采用光束偏折近似公式 (9) 可对平台或空心环形强激光束大气传输时热晕效应导致的远场光斑质心偏移进行快速预估, 从而为高能激光系统实际应用中瞄准偏置的预估设置提供快捷评估手段.

## 参考文献

- [1] Su Y, Wan M 2004 *High Energy Laser System* (Beijing: National Defense Industrial Press) p143 (in Chinese) [苏毅, 万敏 2004 高能激光系统 (北京: 国防工业出版社) 第143页]
- [2] Rao R Z 2012 *Modern Atmospheric Optics* (Beijing: Science Press) p482 (in Chinese) [饶瑞中 2012 现代大气光学 (北京: 科学出版社) 第482页]
- [3] Gebhardt F G 1990 *Proc. SPIE* **1221** 2
- [4] Zhang F Z, Li Y K 2004 *Proc. SPIE* **5832** 25
- [5] Huang Y B, Wang Y J, Rao R Z, Gong Z B 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 1461 (in Chinese) [黄印博, 王英俭, 饶瑞中, 龚知本 2002 光学学报 **22** 1461]
- [6] Huang Y B, Wang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6715 (in Chinese) [黄印博, 王英俭 2006 物理学报 **55** 6715]
- [7] Qiao C H, Fan C Y, Wang Y J 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1811 (in Chinese) [乔春红, 范承玉, 王英俭 2008 强激光与粒子束 **20** 1811]
- [8] Zhang P F, Fan C Y, Qiao C H 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0213002 (in Chinese) [张鹏飞, 范承玉, 乔春红 2012 中国激光 **39** 0213002]
- [9] Zhang P F, Qian C H, Feng X X, Li N, Huang T, Fan C Y, Wang Y J 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 1001001 (in Chinese) [张鹏飞, 乔春红, 冯晓星, 李南, 黄童, 范承玉, 王英俭 2017 光学学报 **37** 1001001]
- [10] Wu S Y, Li X Y, Luo X 2018 *Opto-Electronic Eng.* **45** 170620 (in Chinese) [吴书云, 李新阳, 罗曦 2018 光电工程 **45** 170620]
- [11] Chen X W, Li X B, Wei H L, Dei C M, Luo T, Zhu W Y, Weng N Q 2018 *Acta Opt. Sin.* **38** 1001001 (in Chinese) [陈小威, 李学斌, 魏合理, 戴聪明, 罗涛, 朱文越, 翁宁泉 2018 光学学报 **38** 1001001]
- [12] Li X Q, Cao J Y, Ding Z L, Ji X L 2019 *Acta Opt. Sin.* **39** 0126020 (in Chinese) [李晓庆, 曹建勇, 丁洲林, 季小玲 2019 光学学报 **39** 0126020]
- [13] Yan W, Chen Z H, Du T J, Guan Q 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 1032001 (in Chinese) [闫伟, 陈志华, 杜太焦, 关奇 2016 红外与激光工程 **45** 1032001]
- [14] Bradley L C, Herrmann J 1974 *Appl. Opt.* **13** 331
- [15] Xie X G, Zhang J Z, Yue Y F 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 2536 (in Chinese) [谢晓钢, 张建柱, 岳玉芳 2013 强激光与粒子束 **25** 2536]
- [16] Wang Y J, Fan C Y, Wei H L 2015 *Laser Beam Propagation and Applications through the Atmosphere and Sea Water* (Beijing: National Defense Industrial Press) p157 (in Chinese) [王英俭, 范承玉, 魏合理 2015 激光在大气和海水中传输及应用 (北京: 国防工业出版社) 第157页]

## Analysis of beam deviation induced by thermal blooming effect when high-energy laser propagating up in atmosphere

Zhang Jian-Zhu   Zhang Fei-Zhou   Su Hua

Hu Peng   Xie Xiao-Gang   Luo Wen<sup>†</sup>

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

(Received 16 June 2021; revised manuscript received 30 July 2021)

### Abstract

Based on the thermal blooming effect theory for high-energy laser propagating in atmosphere, the vector model concept of thermal distortion parameter  $N_D$  is put forward. Based on the vector model concept of thermal distortion parameter and the laser system simulation software EasyLaser, the scaling law between the centroid offset of laser beam farfield and the vector thermal distortion parameter is simulated and analyzed. The simulation results indicate that the centroid offset quantity is in direct proportion to the modulus of vector thermal distortion parameter  $N_D$ , and the centroid offset direction is opposite to the direction of vector thermal distortion parameter  $N_D$ . Based on the scaling law, by real-time measuring the atmospheric parameters on laser beam propagation path, the beam deviation of laser system can be conveniently estimated in practical application.

**Keywords:** thermal blooming effect, beam deviation, thermal distortion parameter, vector model

**PACS:** 42.68.Ay, 42.68.Wt, 42.79.Ag

**DOI:** 10.7498/aps.70.20211138

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [luo\\_wen@iapcm.ac.cn](mailto:luo_wen@iapcm.ac.cn)