

# 准直光束上行传输稳态热晕的全局敏感性分析

陈小威<sup>1,2</sup>, 李学彬<sup>1</sup>, 魏合理<sup>1</sup>, 戴聪明<sup>1</sup>, 罗涛<sup>1</sup>, 朱文越<sup>1</sup>, 翁宁泉<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 引入全局敏感性分析方法, 研究典型传输场景下 113 个输入参数的不确定性对热畸变参数( $N_D$ )数值模型的影响。通过主效应检测将输入参数分为对  $N_D$  影响重要的参数和不重要的参数; 把主效应检测筛选出的不重要参数固定后, 采用基于方差的敏感性分析方法定量评估 20 个重要输入参数对  $N_D$  的影响。结果表明, 低空大气参数的影响较大, 它们既可以直接对  $N_D$  产生影响, 也可以通过和其他参数相互作用对  $N_D$  产生影响; 对  $N_D$  影响最重要的参数是低空大气吸收系数。所得结果能够指导实际工作中大气参数的测量和模式的构建。

**关键词** 大气光学; 敏感性分析; 热晕效应; 吸收系数; 散射系数

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1001001

## Global Sensitivity Analysis of Uplink Steady-State Thermal Blooming for a Collimated Beam

Chen Xiaowei<sup>1,2</sup>, Li Xuebin<sup>1</sup>, Wei Heli<sup>1</sup>, Dai Congming<sup>1</sup>, Luo Tao<sup>1</sup>,  
Zhu Wenyue<sup>1</sup>, Weng Ningquan<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China,  
Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China,  
Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** Herein, global sensitivity analysis is performed to analyze the numerical model of the thermal blooming distortion parameter ( $N_D$ ) with 113 uncertain input factors in typical transmission scenarios. First, the elementary effect test ranks factors in order of their importance and screens insensitive factors. Next, variance-based sensitivity analysis quantifies the sensitivity of the important factors and investigates the interactions between factors. Our results reveal that the atmospheric characteristics in the propagation path's first few kilometers affect  $N_D$  the most. These characteristics can either affect  $N_D$  alone as well as with other factors. The most important parameters are atmospheric absorption coefficients at low attitude. These findings can guide the measurement and model construction of atmospheric parameters.

**Key words** atmospheric optics; sensitivity analysis; thermal blooming effect; absorption coefficient; scattering coefficient

**OCIS codes** 010.1300; 010.3310; 350.6830

## 1 引 言

激光在大气中传输时会与大气介质相互作用产生一系列线性与非线性效应, 如: 大气吸收、大气散

射、湍流效应和热晕效应等<sup>[1-3]</sup>。对这些效应的研究, 能够回避或减小大气对光束传输的影响, 为光电系统的评估和优化提供参考<sup>[4]</sup>。激光大气传输的效果除了与光电系统参数有关, 还受传输场景中实际

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-04-10; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(41375017)

\* E-mail: wnq@aiofm.ac.cn

大气的影晌。与激光传输效果相关的实际大气参数主要是气象参量和大气光学参量,前者包括温度、压强、湿度、风速等,后者包括湍流结构常数、湍流内外尺度、大气吸收系数、大气消光系数等<sup>[5]</sup>。国内外机构研制出大量的测量仪器并坚持长期测量,积累了丰富的资料,建立了标准大气光学参量模式和数据库,为激光大气传输提供相关研究服务<sup>[1,6-7]</sup>。

激光大气传输的热晕效应指高能激光加热大气,引起传输路径上大气介质密度发生变化,进而造成光束扩展、相位畸变和能量衰减<sup>[8]</sup>。由于光束能量高、实验测量费用昂贵等原因,数值模拟是研究热晕效应的重要手段。数值模拟的准确性不仅与理论模型有关,还与输入数值模型的大气参数有关。为了对热晕效应做出全面而准确的评估,并指导实际工作中大气参数的测量和模式的构建,需要研究大气参数对激光传输热晕效应的影响。国外的研究中,Pries<sup>[6]</sup>给出了地基光电系统斜程传输对风速廓线、光学湍流廓线、温度廓线、相对湿度廓线、气溶胶等参数测量的误差要求;Fiorino等<sup>[9]</sup>研究了典型中纬度地区光学湍流、相对湿度、大气散射等大气参数对高能激光大气边界层传输的影响。国内的研究中,黄印博等<sup>[10]</sup>数值分析了大气测量误差对水平及低仰角斜程激光大气传输的影响;张建柱等<sup>[11]</sup>统计分析了高能光束近地面水平传输时大气参数精度对传输效果的影响。

热晕效应的物理过程复杂,涉及参数众多,对于这样的非线性物理过程,已有的研究存在两个方面的局限:1)研究中均假设激光传输路径上参数均匀分布,没有考虑实际传输场景中参数的空间变化对传输效果的影响;2)对参数影响的分析采用的是局部敏感性分析(LSA)方法,即固定其他参量的值以研究某一个参量的变化对输出的影响。本文引入全局敏感性分析(GSA)方法,分析典型大气模式下不同输入参数对准直光束上行传输稳态热晕敏感性的影响。

## 2 热畸变参数的数值模型

### 2.1 热畸变参数的理论表达式

高能激光大气传输的热晕效应是非常复杂的物理过程,涉及到大气介质的光学、流体动力学、运动和热传递等方面的特性。联合求解流体动力学方程和光波傍轴近似波动方程可以得到热晕效应在若干假定下的解析结果<sup>[1]</sup>。工程中通常用 Bradley-Hermann 热畸变参数  $N_D$ <sup>[12]</sup> 来度量热晕效应引起的光束相位畸变强度, $N_D$  越大,热晕效应越强。对

于地基光电系统发射的准直光束,上行传输  $H$  距离处的热畸变参数的表达式<sup>[5]</sup>为

$$N_D(H, \theta_z) = \frac{C_A k P \sec \theta_z}{D} \int_{H_L}^H \frac{\alpha_T(h) T_0 t(h)}{v_E(h) T(h)} dh, \quad (1)$$

式中: $H_L$ 为地基光电系统的海拔高度; $C_A$ 为温度  $T_0 = 273$  K 时的值; $t(h)$ 为积分透过率; $\alpha_T(h)$ 为大气吸收系数; $\theta_z$ 为发射光束的天顶角; $P$ (单位:kW)为发射激光功率; $D$ (单位:m)为光束直径; $v_E(h)$ (单位:m/s)为光束旋转速度和测量风速合成的有效风速; $T(h)$ (单位:K)为大气温度; $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ (单位: $\mu\text{m}$ )为激光波长。

$C_A$ 的表达式为

$$C_A = \frac{-4\sqrt{2}}{\rho_0 C_P} \frac{dn}{dT} = 4.72 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{J}^{-1}, \quad (2)$$

式中: $n$ 为大气折射率; $\rho_0$ 为高度  $H_L$ 处的大气密度; $C_P$ 为定压比热容。 $t(h)$ 的表达式为

$$t(h) = \exp\left\{-\sec \theta_z \int_{H_L}^h [\alpha_T(h') + \sigma_T(h')] dh'\right\}, \quad (3)$$

$\alpha_T(h)$ 的表达式为

$$\alpha_T(h') = k_m(h') + k_a(h'), \quad (4)$$

$\sigma_T(h)$ 的表达式为

$$\sigma_T(h') = \sigma_m(h') + \sigma_a(h'), \quad (5)$$

式中: $\sigma_T(h)$ 为大气散射系数; $k_m(h')$ 、 $k_a(h')$ 、 $\sigma_m(h')$ 和  $\sigma_a(h')$ 分别为相应高度的分子吸收系数、气溶胶吸收系数、分子散射系数和气溶胶散射系数。

### 2.2 数值模型的不确定性来源

(1)式为  $N_D$  的数值模型,包含两重积分和各种参数的复杂表达式,难以直接求解,本研究通过数值积分的方法求解。此数值模型结果的不确定性主要来自模型结构的缺陷和输入参数的不确定性。在决定数值模型结构的参数中,本研究重点讨论积分空间分辨率的影响。在模型输入参数中,本研究考虑4个参数廓线:大气吸收系数、大气散射系数、有效风速和大气温度廓线。

考虑典型的大气传输场景,并构建相应的大气参数廓线。激光发射功率  $P = 30$  kW, 光束波长  $\lambda = 1.315$   $\mu\text{m}$ , 光束直径  $D = 1$  m, 光束天顶角  $\theta_z = 0^\circ$ , 光束起始海拔高度  $H_L = 0$  km, 考虑上行传输 30 km 的热畸变效应,即  $H = 30$  km。在美国空军地球物理实验室(AFGL)中纬度夏季模式大气下,采用 LBLRTM 和 HITRAN2004 计算大气分子吸收和散射系数,采用 MODTRAN5 计算能见度为

23 km时的大气气溶胶吸收和散射系数<sup>[7,13]</sup>。大气温度和风速廓线由中国中纬度地区多年高精度探空数据统计得到。本研究不考虑风向变化的影响,  $v_E(h)$ 由光束旋转速度和实测大气风速  $v(h)$  直接相加得到。构建的上述 4 个参数的平均廓线在图 1(a)~(d)中由黑色方框表示。对应标准大气的空间分辨率,本研究考虑 28 个高度:0~25 km 每隔 1 km取一个高度,27.5 km和 30 km。为方便讨论,将海拔  $i$ (单位:km)的大气吸收系数、大气散射系数,测量风速和大气温度廓线分别表示为  $\alpha_i, \sigma_i, v_i$  和  $T_i$ 。

全局敏感性分析需要设定每个不确定输入参数

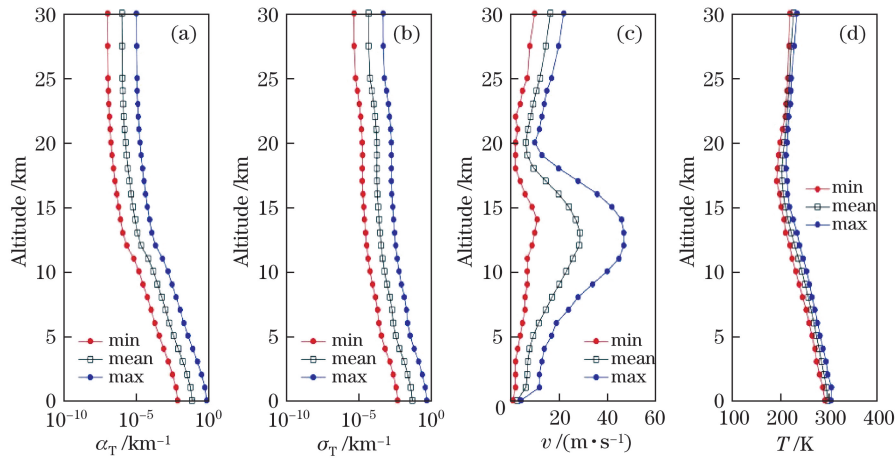


图 1 参数廓线及其不确定性变化范围。(a)大气吸收系数;(b)大气散射系数;(c)测量风速;(d)温度

Fig. 1 Profiles of parameters and their uncertainty range. (a) Atmospheric absorption coefficient; (b) atmospheric scattering coefficient; (c) measured wind speed; (d) temperature

### 3 敏感性分析

敏感性分析研究模型输出的不确定性和输入参数不确定性间的关系,即不同输入参数的不确定性对输出不确定性的影响<sup>[14]</sup>。敏感性分析分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部敏感性分析在指定的单个参数变化区间内取值,在同时保持其他参数不变的情况下,考虑这个参数的变化对模型输出的影响。这种方法一次只能得到一个参数对结果的影响,且计算结果严重依赖其他参数的取值。另外,局部敏感性分析只对输入和输出存在线性关系的模型才会得到较准确的结果。全局敏感性分析考虑输入空间所有参数同时变化对模型输出的影响,而且可以量化输入参数间的交互作用对输出的影响。

全局敏感性分析方法按功能可以划分为 4 步<sup>[15]</sup>:筛选出不重要的参数(FF),按照变量的重要性将变量排序(FP),将输出不确定性降低到指定范围(VC),根据特定范围内的输出找到对应的输入

的变化范围。假定大气吸收和散射系数的不确定性为一个量级,大气风速在相应高度层多年探空数据风速分布的 0.1 和 0.9 分位数之间变化,大气温度在相应高度层多年探空数据的最大值和最小值之间取值。图 1(a)~(d)中红色和蓝色点线给出了每个高度层参数的变化范围。积分空间分辨率  $R$  取 50 个离散值,即  $R = (20, 40, \dots, 980, 1000)$  m。因而,本研究的数值模型共有 113 个不确定输入参数。数值计算中,采用插值方法将 28 个高度上的参数插值到更精细的分辨率,大气吸收和消光系数采用对数插值,温度和风速采用线性插值。

(FM)。在不同领域中,全局敏感性分析已被广泛地用于模型评估、模型校正、模型简化等<sup>[15]</sup>。激光大气传输的热晕效应是一种非线性效应,  $N_D$  的解析表达式中包含不同参数在各个高度的相互作用,对于这样复杂的模型,目前还未发现采用全局敏感性分析方法进行分析的研究。本研究引入全局敏感性分析方法,首先采用主效应检测(EET)方法筛选掉不重要的参数,并将不重要参数的值固定;然后采用基于方差的敏感性分析(VBSA)方法定量评估重要参数对  $N_D$  的影响。

#### 3.1 EET

EET 是一种定性的敏感性分析方法,当输入变量太多时,可以用 EET 筛选出不重要的参数。EET 按重要性由强到弱给出变量的相对顺序。其模型为

$$y = f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_M). \quad (6)$$

假定该模型有  $M$  个输入,即  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ , 一个输出  $y$ 。定义输入空间中第  $i$  个输入参数  $x_i$  对输出  $y$  的主效应为

$$d_i^{(j)}(x) = \frac{f(x_1^{(j)}, \dots, x_i^{(j)} + \Delta_i^{(j)}, \dots, x_M^{(j)}) - f(x_1^{(j)}, \dots, x_i^{(j)}, \dots, x_M^{(j)})}{\Delta_i^{(j)}} \quad (7)$$

式中： $j$  表示  $x_i$  采样空间中的第  $j$  个样本； $\Delta_i^{(j)}$  是差分因子，其与  $x_i$  的变化范围有关。如果在  $x_i$  变化范围内取  $r$  个样本，那么主效应的平均值 ( $\mu$ ) 和方差 ( $\Sigma$ ) 的表达式为<sup>[16-17]</sup>

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |d_i^{(j)}|, \quad (8)$$

$$\Sigma_i = \frac{1}{1-r} \sum_{j=1}^r (d_i^{(j)} - \mu_i)^2, \quad (9)$$

式中： $\mu_i$  表示  $x_i$  的总体不确定性对  $y$  的影响； $\Sigma_i$  表示  $x_i$  与其他参数的相互作用对  $y$  的影响。当  $\mu_i = 0$  时， $x_i$  对  $y$  无影响；当  $\Sigma_i = 0$  时， $x_i$  对  $y$  无非线性影响；当  $\mu_i$  较大且  $\Sigma_i$  较小时， $x_i$  对  $y$  有弱非线性影响；当  $\mu_i$  较小且  $\Sigma_i$  较大时， $x_i$  对  $y$  有强非线性影响。

### 3.2 VBSA

VBSA 方法采用模型输出  $y$  分布的统计方差来定量表征不确定性，用输入参数  $x_i$  的方差和  $y$  方差的比值表示  $x_i$  的敏感性。VBSA 将模型输出的方差进行分解，得到关于输入参数间的不同阶次的敏感性，其中最重要的两个参数是一阶指数  $S_i$  和总体指数  $S_{Ti}$ 。 $S_i$  又被称为主效应，表示不考虑  $x_i$  和其他参数的相互作用时， $x_i$  独自对  $y$  的影响。 $S_{Ti}$  又被称为总体效应，表示  $x_i$  对  $y$  的总体作用，包含主效应和  $x_i$  与其他参数的相互作用。

$S_i$  和  $S_{Ti}$  的表达式为<sup>[18-19]</sup>

$$S_i = \frac{V_{x_i} \{E_{x_{-i}} [f(x) | x_i]\}}{V[f(x)]}, \quad (10)$$

$$S_{Ti} = \frac{E_{x_{-i}} \{V_{x_i} [f(x) | x_i]\}}{V[f(x)]}, \quad (11)$$

式中： $x_{-i} = \{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, x_M\}$  表示除去  $x_i$  后  $x$  中其他参数的集合； $E\{\cdot\}$  表示求平均； $V[\cdot]$  表示求方差。

## 4 敏感性分析结果

全局敏感性参数的计算需要通过具体的采样方法来实现，本研究采用 Saltelli 等<sup>[14]</sup> 提出的方法，利用拉丁超几何抽样在输入变量的分布空间内多次随机采样，计算相关敏感性参数的估计值，并用自举法计算每个统计量的置信区间。

### 4.1 EET 结果

对于第  $i$  个参数  $x_i$  的主效应  $d_i$ ，本研究中采样个数  $r$  取为 1000。113 个输入参数总共需要计算

1000 × (113 + 1) = 114000 次  $N_D$  的数值模型<sup>[14]</sup>，将 EET 的计算结果在图 2(a) 中的  $\mu$ - $\Sigma$  平面上表示，图 2(b) 给出了图 2(a) 中  $\mu < 10$  的情况。图中圆圈中心表示平均值，横向和纵向方框边界分别表示  $\mu$  和  $\Sigma$  的显著水平为 0.1 的置信区间。图中某参数所处位置的  $\mu$  越大表示该参数对  $N_D$  的总体影响越大， $\Sigma$  越大表示该参数和其他参数的相互作用对  $N_D$  的影响越大。通常，EET 用  $\mu$  的值来表征参数相对重要性的大小，根据  $\mu$  对参数进行排序。通过设置一个  $\mu$  的参考值作为筛选阈值可以将输入参数划分为重要参数和不重要参数，本研究将筛选阈值设为 1。

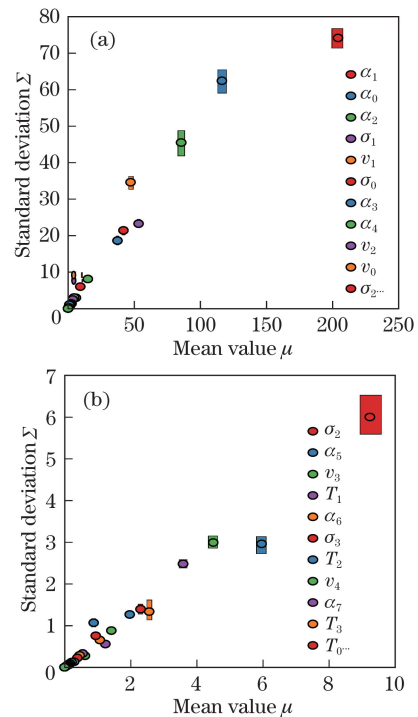


图 2 EET 计算的每个参数主效应的平均值  $\mu$  和方差  $\Sigma$ 。  
(a)  $0 < \mu < 250$ ；(b)  $0 < \mu < 10$

Fig. 2 Mean value  $\mu$  of the absolute values and standard deviation  $\Sigma$  of the distribution of the elementary effects calculated via EET. (a)  $0 < \mu < 250$ ；  
(b)  $0 < \mu < 10$

图 2(a) 和 (b) 的图例按  $\mu$  从大到小的顺序给出了前 21 个参数。所有 113 个不确定输入参数中，共有 20 个参数的主效应的平均值大于筛选阈值，它们是  $\alpha_0 \sim \alpha_7, \sigma_0 \sim \sigma_3, v_0 \sim v_4, T_1 \sim T_3$ 。可见，对  $N_D$  影响较大的都是低空大气参数，因而在实际测量或建模过程中应该给予格外关注。其他输入参数的

$\mu < 1$ , 将其称为不重要参数, 在实验条件有限或需要简化模型的情况下, 可以将这些不重要参数设定为某些参考值而忽略其变化对模型输出的影响。对  $N_D$  影响最大的前三个参数是  $\alpha_1, \alpha_0$  和  $\alpha_2$ 。图 2(a) 显示它们的主效应的平均值远大于方差, 表明它们对  $N_D$  的影响大部分来源于线性作用, 这与物理过程相吻合。在光束传播初始路径上, 有效风速较小, 随着吸收系数的变大, 大气介质吸收激光能量引起热晕效应增强。需要指出的是, 积分分辨率的重要性排在第 22 位, 这表明其对  $N_D$  的影响在一般情况下可以忽略。

#### 4.2 VBSA 结果

现在把 EET 筛选出的不重要参数固定, 将大气参数取为平均值, 积分分辨率取为 100 m, VBSA 能够定量评估 20 个重要输入参数对  $N_D$  的影响。本研究中基本样本个数是 5000, 20 个参数共需计算  $5000 \times (20 + 2) = 110000$  次  $N_D$  的数值模型<sup>[14]</sup>。

图 3 是 VBSA 计算得到的 20 个重要参数的一阶指数  $S_i$  和总体指数  $S_{Ti}$ , 橙色和蓝色方框分别表示  $S_i$  和  $S_{Ti}$  的显著水平为 0.1 的置信区间。当  $S_i$  和  $S_{Ti}$  的值接近 0 时, 由于计算误差会出现负值, 这可以通过增加样本个数来避免。对于每个不确定输入参数,  $S_{Ti}$  的值大于  $S_i$ , 说明这些参数既可以直接对  $N_D$  产生影响, 也通过和其他参数相互作用对  $N_D$  产生影响。表 1 给出了这 20 个参数的  $S_i$  和  $S_{Ti}$  的数值以及每个参数和其他参数间的相互作用,  $S_i$  的和为 0.93,  $S_{Ti}$  的和为 2.1, 表明这 20 个参数间存在较强的相互作用, 且这些相互作用对  $N_D$  的影响较大。表 1 同时表明, 影响最大的三个参数是  $\alpha_1, \alpha_0$  和  $\alpha_2$ , 这与 EET 的结果一致。其中, 最重要的参数是  $\alpha_1$ , 它对  $N_D$  不确定性的贡献为 62%。除了上述三个参数, 其他参数总体指数的值和  $S_{Ti} - S_i$  的值大体相同, 说明它们对  $N_D$  的影响主要来源于和其他参数的相互作用。

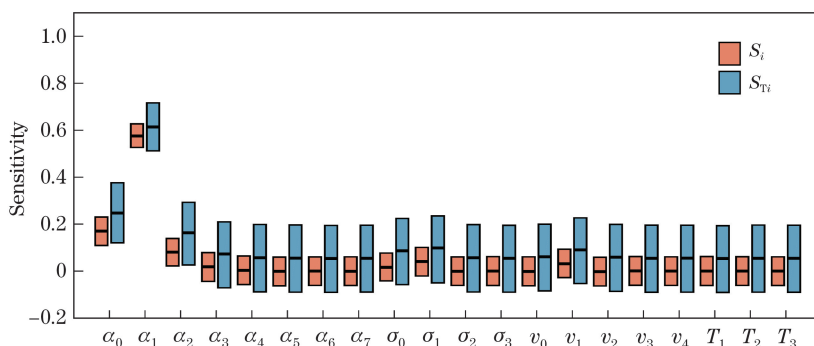


图 3 VBSA 计算得到的一阶指数和总体指数

Fig. 3 Results of main effects and total effects calculated via VBSA

表 1 VBSA 方法得到的每个参数的一阶指数和总体指数

Table 1 Main effects and total effects of each input factors obtained by VBSA method

Factor	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_{Ti} - S_i$	Factor	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_{Ti} - S_i$
$\alpha_0$	0.17	0.25	0.08	$\sigma_2$	0.00	0.06	0.06
$\alpha_1$	0.57	0.62	0.05	$\sigma_3$	0.00	0.05	0.05
$\alpha_2$	0.08	0.16	0.08	$v_0$	-0.00	0.06	0.06
$\alpha_3$	0.02	0.07	0.05	$v_1$	0.03	0.09	0.06
$\alpha_4$	0.00	0.06	0.06	$v_2$	-0.00	0.06	0.06
$\alpha_5$	-0.00	0.06	0.06	$v_3$	0.00	0.05	0.05
$\alpha_6$	0.00	0.05	0.05	$v_4$	0.00	0.06	0.06
$\alpha_7$	0.00	0.05	0.05	$T_1$	0.00	0.05	0.05
$\sigma_0$	0.02	0.09	0.07	$T_2$	0.00	0.05	0.05
$\sigma_1$	0.04	0.10	0.06	$T_3$	0.00	0.05	0.05

## 5 讨 论

本研究得到的敏感性参数是基于拉丁超几何抽

样的统计量, 样本量的选择会影响统计结果, 为了验证结果的收敛性, 可以通过自举法计算敏感性参数统计量的置信范围<sup>[15]</sup>。以 EET 得到的主效应的平

均值为例,如图4所示,图中实线表示 $\mu$ 的均值,虚线表示显著水平为0.1的置信区间边界,图例按照 $\mu$ 的平均值从大到小的顺序依次给出前10个参数。可见,随着模型实现次数的不断增加,每个参数的 $\mu$ 值逐渐趋于稳定,当模型运行114000次后, $N_D$ 的值基本不变。因而可以充分相信,所得结果是可靠的。

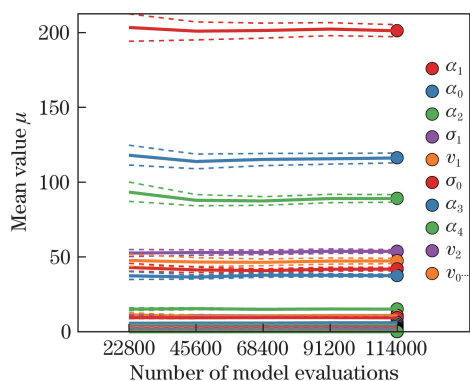


图4 EET计算得到的平均主效应的收敛性分析

Fig. 4 Convergence analysis of the mean values of absolute elementary effects calculated by EET

与敏感性分析相关的是不确定性分析(UA),它只研究模型输出的变化,即量化模型输出的不确定性。敏感性分析的结果能够指导我们有针对性地分析模型的不确定性,高效地提高模型质量。本研究中EET和VBSA分别得到114000和110000个模型输出,EET结果的平均值和方差分别为138.86和80.46,VBSA结果的平均值和方差分别为141.17和80.75。考虑到不同采样样本存在差别,可以认为,在固定不重要的参数之后,两种方法得到 $N_D$ 的不确定性基本相同。因此,在降低 $N_D$ 的不确定性时,只需关注那些重要的参数。就本研究所讨论的传输场景而言,在测量或建模时应该充分研究和降低低空大气参数的不确定性。

## 6 结 论

激光的大气传输效应与光束传播路径上的实际大气参数密切相关,其数值模型的结果受到理论模型和传输路径上的大气参数影响。在典型传输场景下,采用全局敏感性分析方法,分析不同输入参数的不确定性对热畸变参数数值模型的影响。考虑的输入参数包括112个大气参数和1个积分空间分辨率。主要结论如下:

1) EET定性地评估各个参数对 $N_D$ 数值模型影响的相对大小,并将输入参数分为对 $N_D$ 影响重

要的参数和不重要的参数。在113个输入参数中,有20个参数影响较大,它们均是低空大气参数。积分分辨率的重要性排在第22位,在财力物力有限或需要简化模型的情况下,可以将这些不重要参数设定为某些参考值而忽略其变化对模型输出的影响。

2) 把EET筛选出的不重要参数固定,采用VBSA定量评估20个重要输入参数的不确定性对 $N_D$ 数值模型的影响。VBSA给出了每个参数的一阶指数和总体指数,它们的数值表明这些参数既可以直接对 $N_D$ 产生影响,也可以通过和其他参数相互作用对 $N_D$ 产生影响,且这些参数间的相互作用对 $N_D$ 的影响较大。影响最大的三个参数是 $\alpha_1$ , $\alpha_0$ 和 $\alpha_2$ ,其中,最重要的参数是 $\alpha_1$ ,它对 $N_D$ 不确定性的贡献为62%。

3) 用自举法计算了敏感性统计量的置信区间,给出了各个敏感性指数的置信度。比较EET和VBSA的结果发现,两种方法的结果彼此相容,从而进一步证实了本方法的有效性和结果的可靠性。

在实际工程应用中,激光大气传输效应评估的不确定度分析是一个非常重要的课题。全局敏感性方法能够高效地分析不确定性在模型中的传播,评估不同输入参数对传输效应的影响,因此是一个可以用于开展相关研究的有效方法。激光的大气传输效应与传输路径上的大气参数特性和光束特征有关,本研究仅研究了典型地区的平均大气模式下,准直光束上行传输的稳态热晕效应,下一步将分析更多地区、不同传输场景下的激光大气传输效应。

## 参 考 文 献

- [1] Rao R Z. Modern atmospheric optics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-608.  
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-608.
- [2] Tang J C, Qian X M, Miao X K, *et al.* Effects of aberrations on-axis scintillation propagating properties of focus Gaussian beams in turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1101001.  
唐军成, 钱仙妹, 苗锡奎, 等. 像差对聚焦高斯光束大气传输轴闪烁特性的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1101001.
- [3] Zhang P F, Qiao C H, Feng X X, *et al.* Scaling laws of thermal blooming effect of repetitively long pulse laser [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001001.  
张鹏飞, 乔春红, 冯晓星, 等. 序列长脉冲激光热晕效应的定标规律 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001001.

- [4] Gong Z B. Some research progress on high-energy laser propagation in atmosphere[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 114-133.  
龚知本. 激光大气传输研究若干问题进展[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 114-133.
- [5] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1221: 2-25.
- [6] Pries T. High energy laser meteorology (HELMET)[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1221: 254-293.
- [7] McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E A, *et al.* Optical properties of atmosphere [M]. Cambridge: Air Force Systems Command, United States Air Force, 1973.
- [8] Gebhardt F G. High power laser propagation [J]. Applied Optics, 1976, 15(6): 1479-1493.
- [9] Fiorino S T, Randall R M, Echeverria F J, *et al.* Effectiveness assessment of tactical laser engagement scenarios in the lower atmosphere [J]. Journal of Aerospace Computing Information & Communication, 2013, 10(1): 32-39.
- [10] Huang Y B, Wang Y J. Effects of the measurement errors of atmospheric parameters on the laser propagation effects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 720-724.  
黄印博, 王英俭. 激光传输大气参量测量精度要求的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 720-724.
- [11] Zhang J Z, Zhang F Z. Effect of precision of atmospheric parameters on beforehand-estimation of laser propagation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 901-905.  
张建柱, 张飞舟. 大气参数精度对激光传输预估结果的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 901-905.
- [12] Bradley L, Herrmann J. Phase compensation for thermal blooming[J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 331-334.
- [13] Wang Y J, Fan C Y, Wei H L. Laserbeam propagation and applications through the atmosphere and sea water[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 1-327.  
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: 1-327.
- [14] Saltelli A, Ratto M, Andres T, *et al.* Globalsensitivity analysis: the primer[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2008: 1-275.
- [15] Sarrazin F, Pianosi F, Wagener T. Global sensitivity analysis of environmental models: convergence and validation[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 79: 135-152.
- [16] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [17] Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models[J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(10): 1509-1518.
- [18] Sobol I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. Mathematical Modeling & Computational Experiment, 1993, 1(1): 112-118.
- [19] Homma T, Saltelli A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 52(1): 1-17.