

超快激光在复杂大气环境中传输的中红外波谱特性

冯志芳¹, 赵敏¹, 刘勋², 韩祎伟¹, 李维², 舒小芳³, 刘渊¹

(1.太原科技大学 应用科学学院;山西省光场调控与融合应用技术创新中心,太原 030024;
2.中国空间技术研究院 北京空间机电研究所,北京 100094;3.北京量子信息科学研究院,北京 100088)

摘要:利用大气分层模型,通过仿真计算研究了强飞秒激光脉冲在复杂大气环境条件下,在不同位置处激发的中红外波谱特性.结果表明,颗粒物浓度的增加对光丝特性和波谱特性的影响都比较小.然而,当激光在散射介质中成丝传输时,光束的多次聚焦散焦使得光丝保持高强度稳定传输.这是超连续波谱展宽至中红外波段的关键因素,即使在散射较强的降雨环境中,也可通过增加激光脉冲输入功率来实现中红外波谱的展宽.此外,光丝的稳定传输可以有效地抑制大气湍流的扰动,减小大气湍流对中红外波谱特性的影响.这为复杂大气条件下利用中红外波谱远程探测高空中的大气污染物成分提供了重要的理论基础.

关键词:散射介质;大气湍流;光丝特性;波谱特性

中图分类号: O437

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)03-0108-06

强飞秒激光在大气中传输,当非线性克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应达到动态平衡时,会形成“光丝”^[1].因激光脉冲成丝传输在大气污染物遥感探测^[2]等领域有巨大的应用前景而备受关注.特别是,近些年由于光丝诱导的空气激光^[3-4]、超连续波谱^[5]等为大气环境及物质成分的检测^[6-8]提供了一种全新的探测途径,更是促进了这一领域的迅速发展.超连续辐射可覆盖紫外、可见光到红外,由于中红外波段的波谱作为激光源应用于激光雷达领域有其独特的优势,人们选择处于大气传输窗口的中红外波段进行了大量的研究.蔡镐泽等^[9]测量分析了NO₂在中红外波段的吸收光谱特性,证明了中红外差分吸收激光雷达技术的可行性;FLORIAN等^[10]提出一种基于超连续谱激光源用于气溶胶遥感探测的新型激光雷达技术,展示了这种超连续谱激光雷达用于气溶胶测量的可行性.此外,中红外波段包含了许多重要分子的特征谱线,可实现生物组织的高分辨率成像,使其在生物医学^[11]和分子痕迹探测^[12]等领域有广阔的应用前景.在大气成分检测领域,利用中红外超连续谱识别特定污染物分子的红外吸收特征,从而对大气污染物状况进行精确检测.

飞秒激光在大气中传输会受到多种因素的影响.从地面到高空,大气湍流无处不在,对光丝的传输特性产生影响.ACKERMANN等^[13]通过实验研究了大气湍流对激光成丝传输的影响,结果表明,光丝一旦形成,需要相当大的湍流扰动才能被破坏,但当湍流区位于激光束传播的早期阶段时,扰动的影响会更大;EELTINK等^[14]证实了由湍流区引起的折射率变化很大,湍流区域能够使光丝的起点提前或增加光丝的数量;HU等^[15]研究了不同位置的空气湍流对成丝特征的时空影响,并观察到空气中湍流出现得越早,脉冲的形状就变得越不规则,及湍流加在透镜后和光丝形成前会使超连续波谱强度减弱.另外,大气中悬浮着的雾滴、雨滴和气溶胶等粒子对激光脉冲的能量有强的散射效应,影响激光的传输特性^[16-18].张克瑾等^[19]分析了光

收稿日期: 2025-01-07; **修回日期:** 2025-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金(12004043;12304402;11904253);山西省基础研究计划青年项目(20230302121212).

作者简介: 冯志芳(1976—),女,山西晋中人,太原科技大学教授,博士,研究方向为超快激光、光场传输与调控, E-mail: fengzhi@tyust.edu.cn.

通信作者: 刘勋, E-mail: liuxun_laby@163.com.

引用本文: 冯志芳, 赵敏, 刘勋, 等. 超快激光在复杂大气环境中传输的中红外波谱特性[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(3): 108-113. (Feng Zhifang, Zhao Min, Liu Xun, et al. The mid-infrared spectral characteristics of ultrafast laser pulse propagation in complex atmospheric environments[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2026, 54(3): 108-113. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.07.0003.)

丝在冰云、水云、雾、气溶胶和降雨等不同散射介质下的传输特性,表明不同的散射介质对光丝的特性有着重要的影响.曾庆伟等^[20]探究了云雾粒子数浓度和粒子半径、大气湍流、不同散射介质对光丝传输特性的影响,但这些研究大多未考虑激光脉冲从地面向高空传输过程中,大气密度的非均匀性,而且也未涉及光丝激发波谱特性的研究.因此,本文利用大气分层模型,研究超快激光脉冲在复杂大气环境中的中红外波谱特性具有重要的意义.

当强飞秒激光在云、雾、降雨、气溶胶等复杂大气环境中传输时,这些介质会对激光脉冲能量有较强的散射、吸收等作用.通过之前的研究结果^[21]也可知道,在光丝形成之前散射对激光能量呈现 e 指数衰减,而在光丝形成之后,非线性损耗反而会抑制这种衰减,这也意味着利用光丝激光在复杂大气环境中进行遥感探测具有明显的优势.本文从理论上研究了在真实大气条件下,强飞秒激光束在距离地面以内不同高度处产生光丝,分析了颗粒物浓度、气溶胶、雾和雨滴散射介质,及大气湍流对中红外波谱特性的影响.

1 模型与传播方程

采用(3D+1)非线性薛定谔方程和耦合的电子密度方程来描述激光电场在慢变包络近似下沿传播轴的演化.在随脉冲移动的坐标系($\tau = t - (z/v_g)$, $v_g = c$, c 是真空中光速)下,耦合方程可写为:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{i}{2k_0} \nabla_{\perp}^2 \epsilon - i \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \tau^2} + ik_0 n_K \epsilon - ik_0 \frac{n_e}{2n_c} \epsilon - \frac{\beta^{(K)}}{2} |\epsilon|^{2K-2} \epsilon - \frac{\alpha_{aer}}{2} \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial \tau} = \frac{\beta^{(K)}}{K \hbar \omega_0} |\epsilon|^{2K} \left(1 - \frac{n_e}{n_{at}}\right), \quad (2)$$

$$n_K = \frac{n_2}{2} (|\epsilon(r, \tau, z)|^2 + \frac{1}{\tau_k} \int_{-\infty}^{\tau} \exp(-(\tau - t')/\tau_k) |\epsilon(r, t', z)|^2 dt'), \quad (3)$$

方程(1)右边的第 1 项为衍射项,其中, ∇_{\perp}^2 为拉普拉斯算符, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 代表激光束的中心波数,这里选取波长 $\lambda_0 = 800$ nm. 第 2 项表示的群速度色散,其中色散系数 $k'' = 20$ fs²/m. 第 3 项为克尔效应项,其中, n_K 是非线性折射率,包括瞬时克尔效应和延迟克尔效应.在方程(3)中,非线性折射率 $n_2 = 3.2 \times 10^{-19}$ cm²/W,拉曼响应特征时间 $\tau_k = 70$ fs. 第 4 项和第 5 项分别为等离子体散焦和多光子电离,其中临界等离子体密度 $n_c \approx 1.7 \times 10^{21}$ cm⁻³,多光子吸收系数 $\beta^{(K)} = K \hbar \omega_0 \sigma_K = 3.97 \times 10^{-95}$ cm¹³/W⁷,电离 1 个氧原子所需的光子数 $K = 8$. 最后 1 项为散射项, α_{aer} 为粒子的散射系数. 方程(2)是电子密度方程,式中的初始中性原子密度 $n_{at} = 5.4 \times 10^{18}$ cm⁻³.

从地面到高空大气密度和压强会逐渐减小,在 11 km 范围内压强的变化可用等温模型^[22] $p = p_0 \exp(-z/z_p)$ 来描述,其中 $z_p \equiv RT/(Mg) \approx 8.596$ km, $p_0 = 101\ 325$ Pa,超快激光脉冲与大气分子相互作用的一些参数,如群速度参数 k'' ,非线性折射率 n_2 ,多光子吸收系数 $\beta^{(K)}$ 和初始中性原子密度 n_{at} 与大气压强 p 成正比.

强飞秒激光在大气中传输,一些颗粒物粒子会对激光脉冲能量有散射、吸收等作用,根据 Mie 散射理论可知,粒子的散射效应远远高于其吸收效应.对于单一粒子半径的散射粒子,其散射系数及 Mie 散射截面积 C_s 为^[23]: $\sigma_s(\lambda) = C_s N_t$, $C_s = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)$, 式中, λ 是入射光的波长, N_t 是粒子数浓度, a_n, b_n 是与贝塞尔函数和汉克尔函数有关的 Mie 散射系数^[24]. 它们可以通过以下递推关系计算: $a_n = \frac{\varphi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - m \varphi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{\epsilon_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - m \epsilon'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}$, $b_n = \frac{m \varphi_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - \varphi'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}{m \epsilon_n(\alpha) \varphi'_n(m\alpha) - \epsilon'_n(\alpha) \varphi_n(m\alpha)}$, 式中, $\alpha = 2\pi r/\lambda$ 为颗粒的尺寸参数, r 为颗粒半径.

$$n = \begin{cases} \alpha + 4\alpha^{1/3} + 1, & 0.02 \leq \alpha \leq 8, \\ \alpha + 4.05\alpha^{1/3} + 2, & 8 < \alpha \leq 4\ 200, \\ \alpha + 4\alpha^{1/3} + 2, & 4\ 200 \leq \alpha \leq 20\ 000. \end{cases} \quad (4)$$

在数值模拟中,选用高斯光束作为入射光束,然后通过 1 个焦距为 f 的透镜聚焦后, $\epsilon = \epsilon_0 \exp(-$

$(r^2/\omega_0^2) - (t^2/\tau_0^2) - (ik_0 r^2/2f)$, 式中, ε_0 是初始电场振幅, ω_0 、 τ_0 分别是束腰宽度和脉冲宽度.

2 结果与讨论

在数值仿真计算中,对方程(1)和(2)进行无量纲化处理,采用标准的空间 Crank-Nicholson 和时间傅里叶变换方法,求解耦合方程,这里空间和时间的计算区域要足够大,以保证边界光场为 0,空间和时间的分辨率分别取 $10 \mu\text{m}$ 和 0.293 fs ,以保证足够高的计算精度.

2.1 颗粒物浓度对波谱特性的影响

在真实的大气环境中,像云、雾、雨,及气溶胶等粒子,其大小和粒子数浓度存在很大差别.当粒子数浓度 N_i 大于 $500 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 时,颗粒物对激光脉冲有强的散射效应,光丝将无法形成^[25].这里仍选取文献[25]中的粒子数浓度,即低粒子数浓度 $N_i = 10 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 、中间粒子数浓度 $N_i = 100 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 和粒子数浓度 $N_i = 300 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$,在大气分层模型下,描述其对光丝激发的超连续谱中的中红外波谱特性的影响.从附录图 S1 中可以看出,在激光脉冲从地面向高空传输的过程中,颗粒物的浓度对光丝传输特性的影响较小,特别是光丝在近地面位置处形成时,如图 S1(a)中 $f = 5 \text{ m}$ 、 $f = 10 \text{ m}$ 和 $f = 20 \text{ m}$ 的情况.随着焦距的增加,颗粒物的浓度对光丝产生的起点位置、光丝的长度,及峰值等离子体密度和峰值光强有一定的影响,但影响的幅度并不大.例如,当透镜焦距 $f = 40 \text{ m}$ 时,由于颗粒物对激光脉冲能量的散射效应,在较高的颗粒物浓度 $N_i = 300 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 下的成丝起点位置为 26.95 m 比较低浓度 $N_i = 10 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 下的成丝起点位置 25.74 m 延后 1.21 m ,高颗粒物浓度下等离子体密度的最大值($1.414 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)要比低浓度的情况($1.570 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)低,这便使得颗粒物浓度对超连续波谱从可见光到中红外波段的波谱强度的影响并不明显(图 S1(b)),并且当激光脉冲在 500 m 高空附近成丝时,在中红外波谱 $5 \mu\text{m}$ 处,波谱的强度仍达到了 $1.509 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ (图未展示),与低空($f = 40 \text{ m}$)处的波谱强度($4.525 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$)相比并没有降低.这也意味着利用光丝激发的超连续波谱去探测城市上空的污染物成分是非常有效的.

2.2 颗粒物半径及散射介质对波谱特性的影响

在大气环境中,颗粒物半径的大小也存在明显的差异.对于颗粒物的粒径范围,按照空气动力学去划分,总悬浮颗粒物:指粒径小于等于 $100 \mu\text{m}$ 的颗粒物;可吸入颗粒物:指粒径小于等于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物;细颗粒物:指粒径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物.而对于云、雾、雨、气溶胶等散射介质,雨滴半径通常在 $0.01 \sim 3.50 \text{ mm}$ 之间,温度为零上时,雾滴粒子半径在 $7 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间,气溶胶半径一般不超过 $10 \mu\text{m}$.因为雨滴粒子尺度分布最大、散射最强,气溶胶粒子尺度最小、散射最弱^[19],选取雨滴、雾滴,及气溶胶的半径分别为 $30 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$.在粒子数浓度 $N_i = 100 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 下,根据散射粒子复折射率 $m = 1.329 - 1.25 \times 10^{-7} i$,可计算得到雨滴、雾和气溶胶的散射系数分别为 0.145 m^{-1} 、 0.016 m^{-1} 和 $2.483 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$.

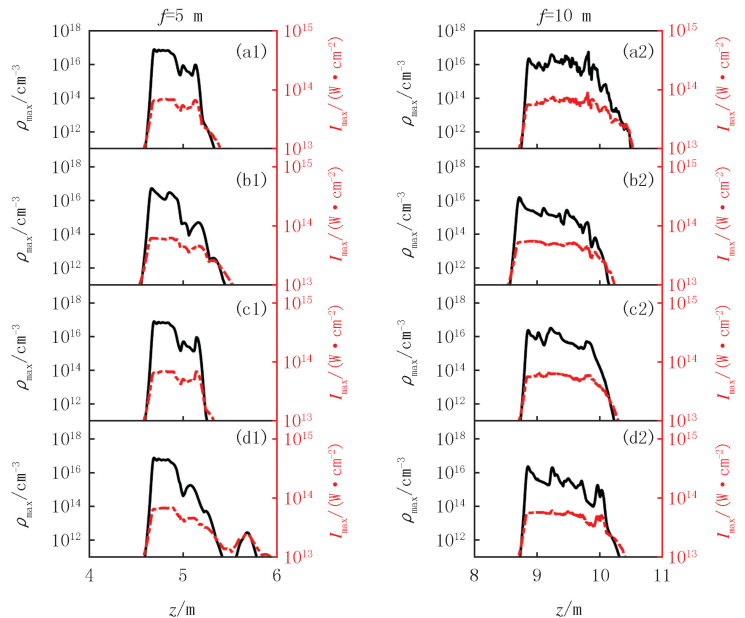
从附录图 S2 中可以看出,相比于粒子浓度,不同散射粒子由于其半径的不同,对激光脉冲能量的散射强弱也不同,因此对光丝的特性和超连续波谱的影响都较大.当透镜焦距 $f = 10 \text{ m}$ 时,雨滴粒子对光丝产生的起点位置、光丝的长度、峰值等离子体密度和峰值光强,以及超连续波谱特性已有显著的影响.当焦距 $f = 20 \text{ m}$ 时,雨滴粒子对激光脉冲能量的散射最强,将会使峰值等离子体密度和峰值光强的值大幅降低,即使能量增加到 8 mJ ,光丝激发的中红外波谱也只能展宽至 $3 \mu\text{m}$ 附近,且波谱强度也非常低.当焦距增加到 $f = 30 \text{ m}$ 时,激发的中红外波谱展宽至 $4 \mu\text{m}$,需要增加的激光脉冲能量高达 30 mJ ,随着焦距增加到 $f = 40 \text{ m}$,当输入能量增加到 95 mJ 时,中红外波谱即可展宽至 $5 \mu\text{m}$,且波谱强度也可增加到 $3.043 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,但仍低于气溶胶、雾散射介质中的波谱强度.

2.3 大气湍流对波谱特性的影响

强飞秒激光脉冲从地面向高空传输时,大气湍流会使空气的密度或温度发生涨落,引起空气折射率的随机扰动,从而导致光波前相位和振幅的随机变化,因此在激光传输过程中,大气湍流会影响激光束在时间、空间上的分布.这里讨论湍流位于不同的传输区域,以便了解湍流对光丝特性及波谱的影响.大气湍流的强度用折射率结构常数 C_n^2 来表征,其划分方式为: $C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13}$ 为强湍流, $2.5 \times 10^{-13} \leq C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17}$ 为中等湍流, $C_n^2 \leq 6.4 \times 10^{-17}$ 为弱湍流.采用折射率结构常数 $C_n^2 = 2.7 \times 10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$,外尺度 $L_0 = 1 \text{ m}$,内尺度 $l_0 =$

1 mm,其他参数仍选取输入能量 $E_{in}=3$ mJ、束腰宽度 $w_0=10$ mm 和脉冲宽度 $\tau_0=50$ fs.并且模拟过程中在湍流加入成丝前和成丝传输过程中每隔 0.5 m 插入 1 个相位屏,湍流加在整个传输过程中每隔 1 m 插入一个相位屏.图 1 给出了 4 种情况:不考虑湍流;从地面到激光自聚焦之前的传输路径中加入湍流;成丝后的光纤传输阶段加入湍流;湍流加于激光光束传输的整个路径中.在透镜焦距 $f=5$ m 和 $f=10$ m 下,峰值等离子体密度和峰值光强的演化.当光丝在近地面位置($f=5$ m)产生时,湍流加于成丝之前和整个传输过程中,对峰值等离子体密度和峰值光强的值有一定的影响,而且对光丝的稳定性的影响也有影响,而湍流加于光丝形成之后时,则影响较小,只是光丝的长度有些许缩短,这里湍流对光丝特性影响的规律实际与文献[13–15]是一致的.随着焦距增加到 $f=10$ m 时,无论湍流加于哪个传输阶段,均对光丝特性有一定影响,但通过比较(c2, b2, d2)又可看出,在成丝过程中加入湍流,光丝特性受湍流的影响还是要比湍流加于成丝之前和整个光束传输路径中要小很多.

从图 2 中可以看出,湍流对整体波谱演化有一定影响,特别是,湍流加于成丝前的情况,对光丝的特性影响最大(见图 1(b1, b2)),从而对光丝激发的波谱影响也最大,如图 2(b1, b2)所示.但从图 2(e, f)可以看出,除了湍流加于成丝前的情况,对波谱的中心强度和稳定性有一定的影响,其他情况下湍流对第 1 个聚焦周期波谱展宽范围和波谱强度的影响都非常小.在透镜焦距 $f=10$ m 下, $5 \mu\text{m}$ 处波谱强度甚至可以达到 $3.383 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$.这也意味着,在强飞秒激光脉冲从地面向高空的传输过程中,即使遇到大气湍流的扰动,利用光丝激发的超连续波谱去探测空气中的污染物成分具有显著的优势.



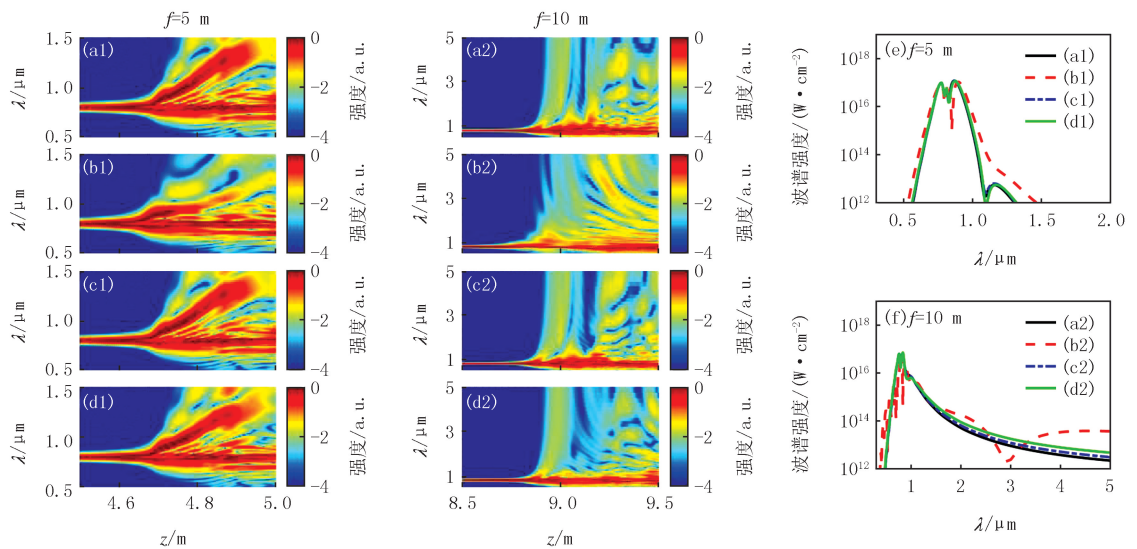
(a1, a2) 无湍流; (b1, b2) 湍流在光丝形成之前; (c1, c2) 湍流在光丝形成后; (d1, d2) 湍流在整个传输过程中. I_{max} 为激光的峰值强度.

图1 大气湍流对光丝特性的影响

Fig.1 The effect of atmospheric turbulence on the characteristics of filament

3 结论

本文通过数值仿真计算,分析了颗粒物浓度、散射介质及大气湍流等复杂大气条件对中红外波谱特性的影响.结果表明,颗粒物浓度的增加对光丝特性和光谱特性的影响都比较小,当激光脉冲在气溶胶、雾和雨滴等散射介质中传输时,由于其粒子半径的不同,对激光脉冲能量散射强弱也不同,因此,对光丝特性和光谱特性的影响较大.在气溶胶散射介质中, $5 \mu\text{m}$ 处的波谱强度达到 $4.444 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$,即使在散射较强的降雨环境中,随着焦距增加到 $f=40$ m,当输入能量达到 95 mJ 时,中红外波谱即可展宽至 $5 \mu\text{m}$,且波谱强度可达到 $3.043 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$.另外,大气湍流对光丝的传输特性有不同的影响,但在成丝之后加入湍流,对光丝特性影响较小,这也说明光丝保持高强度稳定地传输,可以有效抑制大气湍流的扰动,因此对波谱的影响也较小.总之,在高空利用超连续谱的中红外波段的波谱去探测大气污染物成分是非常有效的方法,在散射较强的降雨环境中进行探测,可通过增加激光脉冲输入功率来实现,即使遇到大气湍流的扰动,利用中红外波谱去探测也具有显著的优势.这可能为复杂大气条件下大气污染物探测提供了一种有效的途径.



(a1-d2)对应图1的超连续谱的演化;(e, f)为波谱强度。

图2 湍流对超连续谱的影响

Fig.2 The influence of turbulence on the supercontinuum spectrum

参 考 文 献

- [1] COUAIRON A, MYSYROWICZ A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2/3/4): 47-189.
- [2] KASPARIAN J, RODRIGUEZ M, MÉJEAN G, et al. White-light filaments for atmospheric analysis[J]. *Science*, 2003, 301(5629): 61-64.
- [3] ZHANG N, XIE H Q, ZHANG H, et al. Electronic-resonance-enhanced coherent Raman spectroscopy with a single femtosecond laser beam[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(6): 2300020.
- [4] LU X, CHEN Y W, MAZZA F, et al. Single-shot single-beam coherent Raman scattering thermometry based on optically induced air laser[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 315.
- [5] WANG T J, CHEN N, GUO H, et al. 飞秒强激光大气遥感新技术的原理和研究进展[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0700001.
- [6] CHIN S L, XU H L, LUO Q, et al. Filamentation "remote" sensing of chemical and biological agents/pollutants using only one femtosecond laser source[J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(1): 1-12.
- [7] LABUTIN T A, LEDNEV V N, ILYIN A A, et al. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2016, 31(1): 90-118.
- [8] XU H L, CHIN S L. Femtosecond laser filamentation for atmospheric sensing[J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 32-53.
- [9] 蔡镐泽, 卜令兵, 龚宇, 等. 3.4 μm 处 NO₂ 吸收光谱特性及在差分吸收激光雷达中的应用[J]. *光子学报*, 2019, 48(7): 701001.
CAI H Z, BU L B, GONG Y, et al. Absorption spectrum characteristics of NO₂ near 3.4 μm and its application in differential absorption lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 701001.
- [10] GAUDFRIN F, PUJOL O, RIVIÈRE N, et al. A new lidar technique based on supercontinuum laser sources for aerosol soundings: simulations and measurements; the PERFALIS code and the COLIBRIS instrument[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-21.
- [11] CASSINERIO M, GAMBETTA A, COLUCCELLI N, et al. Absolute dual-comb spectroscopy at 1.55 μm by free-running Er: fiber lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 231102.
- [12] ADLER F, MASŁOWSKI P, FOLTYNOWICZ A, et al. Mid-infrared Fourier transform spectroscopy with a broadband frequency comb[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 21861.
- [13] ACKERMANN R, MÉJEAN G, KASPARIAN J, et al. Laser filaments generated and transmitted in highly turbulent air[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1): 86-88.
- [14] EELTINK D, BERTI N, MARCHIANDO N, et al. Triggering filamentation using turbulence[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(3): 033806.
- [15] HU Y Z, NIE J S, SUN K, et al. Filamentation of femtosecond laser pulse influenced by the air turbulence at various propagation distances[J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 281-286.
- [16] 刘西川, 高太长, 刘志田. 大气气溶胶对激光传输衰减的影响研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012(3): 181.
LIU X C, GAO T C, LIU Z T. Effect of atmospheric aerosols on laser transmission attenuation[J]. *Journal of Atmospheric and Environ-*

- mental Optics,2012(3):181.
- [17] 刘西川,高太长,刘磊.基于非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响[J].红外与激光工程,2013,42(1):167-173.
LIU X C,GAO T C,LIU L.Effect of rainfall on laser transmission attenuation based on non-spherical raindrops[J].Infrared and Laser Engineering,2013,42(1):167-173.
- [18] 沈娜,张祥金,郭婧.水雾对激光引信的衰减[J].光学精密工程,2013,21(4):864-869.
SHEN N,ZHANG X J,GUO J.Attenuation of laser fuse through fog[J].Optics and Precision Engineering,2013,21(4):864-869.
- [19] 张克瑾,刘磊,曾庆伟,等.不同散射介质对飞秒脉冲激光传输特性影响研究[J].物理学报,2019,68(19):144-150.
ZHANG K J,LIU L,ZENG Q W,et al.Influence of different scattering medium on propagation characteristics to femtosecond laser pulses [J].Acta Physica Sinica,2019,68(19):144-150.
- [20] 曾庆伟,刘磊,胡帅,等.强飞秒激光在云雾环境中的非线性传输[J].光学学报,2020,40(15):1519001.
ZENG Q W,LIU L,HU S,et al.Nonlinear propagation of intense femtosecond laser pulses in a foggy and cloudy environment[J].Acta Optica Sinica,2020,40(15):1519001.
- [21] 冯志芳,郝婷,刘勋,等.光丝激光在大气中的传输及中红外波谱特性[J].量子光学学报,2024,30(2):20701.
FENG Z F,HAO T,LIU X,et al.Propagation and mid-infrared spectrum characteristics of optical filament laser in the atmosphere[J].Acta Sinica Quantum Optica,2024,30(2):20701.
- [22] COUAIRON A,FRANCO M,MÉCHAIN G,et al.Femtosecond filamentation in air at low pressures:Part I:Theory and numerical simulations[J].Optics Communications,2006,259(1):265-273.
- [23] 陈卫,方义强,施展,等.基于 Mie 散射理论的云红外辐射传输研究[J].激光与红外,2015,45(8):918-923.
CHEN W,FANG Y Q,SHI Z,et al.Research on cloud IR radiance transfer based on Mie scattering theory[J].Laser & Infrared,2015,45(8):918-923.
- [24] 项建胜,何俊华.Mie 光散射理论的数值计算方法[J].应用光学,2007,28(3):363-366.
XIANG J S,HE J H.Numerical calculation of Mie theory[J].Journal of Applied Optics,2007,28(3):363-366.
- [25] SILAEVA E P,SHLENOV S A,KANDIDOV V P.Multifilamentation of high-power femtosecond laser pulse in turbulent atmosphere with aerosol[J].Applied Physics B,2010,101(1):393-401.

The mid-infrared spectral characteristics of ultrafast laser pulse propagation in complex atmospheric environments

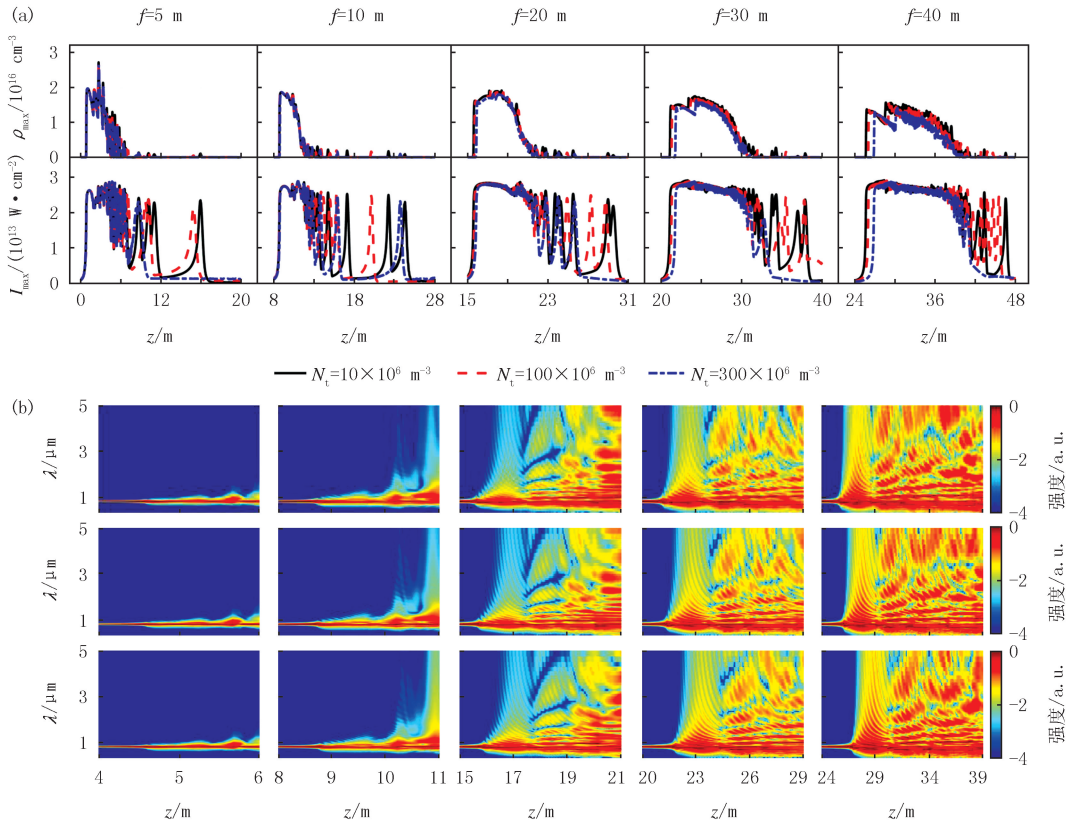
Feng Zhifang¹, Zhao Min¹, Liu Xun², Han Yiwei¹, Li Wei², Shu Xiaofang³, Liu Yuan¹

(1. School of Applied Science; Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100088, China)

Abstract: By using the model of atmospheric stratification, we simulated that the mid-infrared spectral characteristics are generated by intense femtosecond laser pulses at different altitudes under complex atmospheric conditions. The results show that the increase of particle concentration has a relatively little effect on the characteristics of filament and spectrum. However, when the laser pulses are transmitted in scattering media, multiple focusing and defocusing of the laser pulse makes the filament maintain a stable transmission with high-intensity, which is a key factor in broadening the supercontinuum spectrum to the mid-infrared band. Even in a rainfall environment with strong scattering, the broadening of the mid-infrared spectrum can be achieved by increasing the laser pulse input power. Moreover, the stable transmission of the filament can effectively suppress the perturbation of atmospheric turbulence and reduce the influence of atmospheric turbulence on the characteristics of the mid-infrared spectrum. The study provides an important theoretical basis for remotely detecting the components of atmospheric pollutants in high altitude using mid-infrared spectroscopy under complex atmospheric conditions.

Keywords: scattering medium; atmospheric turbulence; light filament property; spectral property

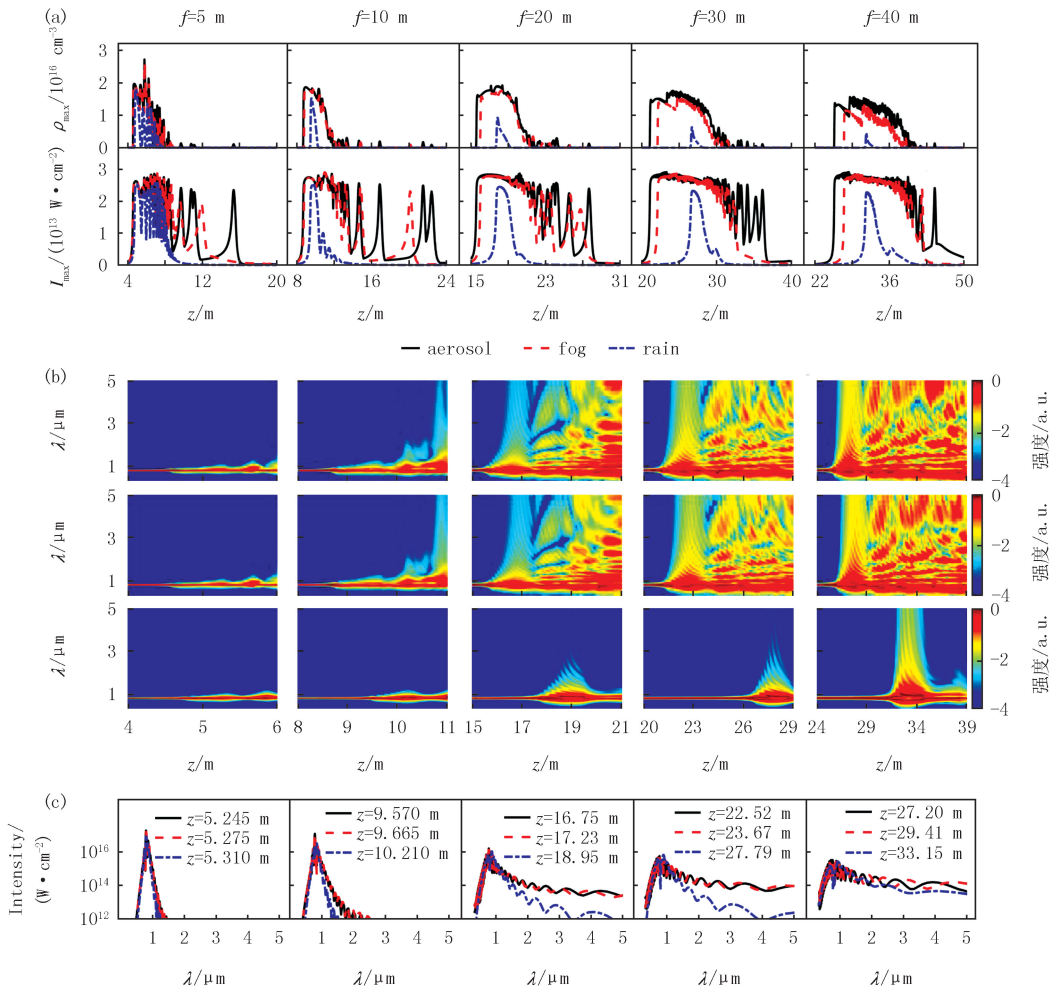
附录



注:固定粒子半径 $r=5\ \mu\text{m}$,在不同焦距 f 下,当粒子数浓度不同时,(a)峰值等离子体密度 ρ 和峰值光强 I 随传输距离 z 的演化;(b)超连续谱的演化。

图S1 粒子浓度对光纤特性和波谱特性的影响

Fig.S1 The influence of particle concentration on the characteristics of filament and spectra



注:在气溶胶、雾和雨滴散射介质中,不同焦距 f 下,峰值等离子体密度 ρ 和峰值光强 I , (a)峰值等离子体密度和峰值光强, (b)超连续谱随 z 的变化, (c)相应于(b)第1次展宽到最宽位置的波谱强度.

图S2 不同散射介质对光丝特性和超连续谱的影响

Fig.S2 The effect of different scattering media on the characteristics of filament and supercontinuum spectra