

基于本征荧光的生物气溶胶测量激光雷达性能

饶志敏 华灯鑫 何廷尧 乐静

Research and analysis on lidar performance with intrinsic fluorescence biological aerosol measurements

Rao Zhi-Min Hua Deng-Xin He Ting-Yao Le Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 200701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.200701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.200701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种以压力一维均匀分布为特征的长条形对顶压砧

[A strip anvil apparatus with linear uniform pressure distribution](#)

物理学报.2016, 65(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100701>

基于电磁拓扑的多腔体屏蔽效能快速算法

[Electromagnetic topology based fast algorithm for shielding effectiveness estimation of multiple enclosures with apertures](#)

物理学报.2016, 65(3): 030702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030702>

CH基团与金刚石(111)面的碰撞反应及其对碳膜生长的影响

[Collision reactions of CH radical on diamond and their effects on the carbon film growth](#)

物理学报.2016, 65(3): 030701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030701>

六方小面相螺旋在各向异性、表面吸附、界面动力学作用下生长的相场

[Phase-Field Modeling of Facet Hexagonal Spirals with Anisotropy, Deposition, and Kinetic Effects](#)

物理学报.2016, 65(2): 020701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020701>

一种基于BLT方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法

[A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures](#)

物理学报.2015, 64(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010701>

基于本征荧光的生物气溶胶测量激光雷达性能*

饶志敏 华灯鑫[†] 何廷尧 乐静

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2016年5月19日收到; 2016年6月18日收到修改稿)

为研究本征荧光对生物气溶胶粒子探测精度的影响, 本文在阐述生物气溶胶荧光光谱信号探测原理的基础上, 设计了一台紫外激光诱导荧光雷达. 该雷达选用波长为266 nm的四倍频固体激光器作为激励光源, 基于本征荧光波长、探测距离等主要参数, 对生物气溶胶荧光光谱回波信号的信噪比及粒子浓度的最小分辨率进行数值仿真分析. 仿真结果表明, 在探测误差小于10%的情况下, 距离为1.5 km时, 系统对生物气溶胶荧光波长的有效探测范围为300—800 nm; 而在距离为2.1 km时, 荧光波长的有效探测范围为300—310 nm. 此外, 在探测距离定义为0.1 km, 荧光波长为350和600 nm时, 系统对生物气溶胶粒子浓度的最小分辨率分别为2个颗粒/L和4个颗粒/L, 最小分辨率的差值为2个颗粒/L. 仿真结果有利于了解荧光波长变动时激光雷达系统的探测准确度, 进而实现大气生物气溶胶更加有效的探测.

关键词: 生物气溶胶, 本征荧光, 激光雷达, 浓度分辨率

PACS: 07.05.Fb, 07.05.Tp, 06.20.Dk, 02.70.Hm

DOI: 10.7498/aps.65.200701

1 引言

当前, 随着公众对大气环境质量的关注, 研究和开发能够实时、快速地监测大气中生物气溶胶粒子浓度的激光雷达探测技术已成为当今热点研究领域之一. 大气中分散着多种多样的生物气溶胶粒子, 如花粉孢子、真菌、细菌、病毒、螨虫及动植物碎裂的分解体等, 其粒径范围介于0.001—100 μm 之间^[1]. 生物气溶胶对人类健康和动植物的生长会造成巨大危害^[2], 且可以作为冰核和云凝结核间接地影响全球气候变化^[3-5]. 相对于无机气溶胶而言, 生物气溶胶能够吸收更多的光, 尤其是较短波长的光, 进而影响大气的供热制冷平衡^[6]. Gruber等^[7]的研究表明, 随着地理环境及季节变化, 生物气溶胶在大气中的数浓度维持在30%左右^[8]. 在热带地区生物气溶胶质量浓度可达55%—95%^[9,10].

本征荧光是生物气溶胶属性判别的重要依据之一^[11]. 生物气溶胶在特定波长的激光诱导下, 会

产生本征荧光^[12], 不同类型的生物气溶胶具有自身特有的吸收光谱和发射光谱^[13-15]; 且在同一紫外波长激发下, 产生的荧光波长峰值存在较大差异^[16,17]. 通过对本征荧光光谱强度的检测和分析, 可实现对生物气溶胶类型的预分类^[18]. 由于本征荧光具备这些物理特性, 所以在大气生物气溶胶探测领域, 激光诱导荧光雷达技术具有良好的应用前景. 在国外, 近年来对生物气溶胶物质的本征紫外吸收峰值与荧光发射峰值^[19]以及紫外激光诱导荧光雷达及荧光光谱的研究^[20,21]也在逐步深入.

本文构建了一台紫外激光诱导生物气溶胶荧光雷达, 描述了荧光雷达方程, 详细给出各器件参数, 对激光能量在大气中的衰减, 各荧光波长的大气透过率, 生物荧光光谱线型函数及生物气溶胶云团荧光回波信号的光子数进行了数值计算; 并在系统的信噪比数值仿真中, 模拟了生物气溶胶云团在不同距离处和不同粒子浓度情况下, 紫外激光荧光雷达的探测性能, 得到系统信噪比随荧光光谱的变化曲线; 并且在相同的参数条件下, 分析了两种生

* 国家自然科学基金(批准号: 61275185, 41405028)和陕西省自然科学基金(批准号: 2015JQ4100)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

物气溶胶粒子浓度的最小分辨率及其差值随系统探测距离变化曲线.

2 紫外激光诱导生物气溶胶荧光雷达系统模型

紫外激光诱导生物气溶胶荧光雷达系统模型如图1所示, 采用重复频率10 Hz的四倍频Nd:YAG固体激光器(脉冲能量60 mJ)作为激发光源, 利用反射镜调节激光脉冲方向, 向生物气溶胶云团发射波长为266 nm的激光脉冲. 如果生物气溶胶云团存在多种类型的生物气溶胶, 则云团在激光脉冲的激发下会发出不同波长的生物本征荧光, 激光雷达系统通过卡塞格林望远镜对荧光光谱信号进行收集并使用光纤将其导入光谱仪中进行分光处理. 多通道光电倍增管负责将分光后的荧光信号转换为电信号并存储在计算机中, 最终由运算程序计算出生物气溶胶所产生本征荧光光谱信号的强度.

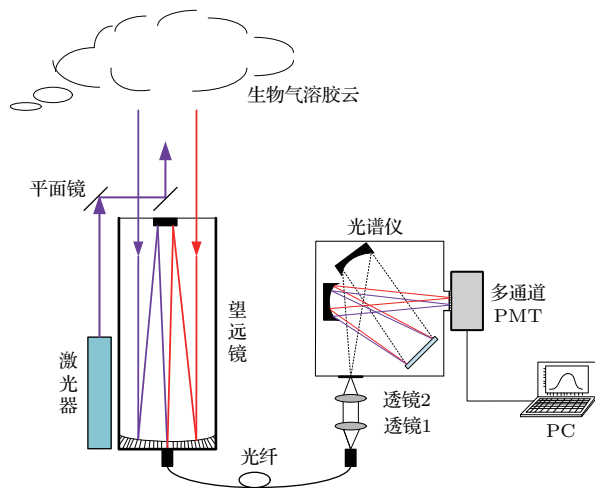


图1 紫外激光诱导生物气溶胶荧光雷达系统模型
Fig. 1. Model of ultraviolet laser induced bioaerosol fluorescence lidar.

3 生物气溶胶荧光回波信号分析

3.1 生物气溶胶探测荧光激光雷达方程

根据生物气溶胶探测的特点及激光诱导荧光雷达的工作原理, 距离 R 处生物气溶胶荧光回波信号光子数 $N(\lambda_1, R)$ 可以通过荧光雷达方程^[22] 得到

$$N(\lambda_1, R) = n_0 \frac{E_0 \lambda_0}{hc} \frac{A_0}{R^2} \xi(R) \eta_0 \Delta R N(R) T_{\lambda_0} T_{\lambda_1} \times T(\lambda_0, R) T(\lambda_1, R)$$

$$\times \int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_1 + \frac{\Delta\lambda}{2}} \frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda}(\lambda_0, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中, n 为激光器发射脉冲数; E 为单脉冲能量(mJ); λ_0, λ_1 分别为激光波长和荧光波长; A_0 为望远镜接收面积(m²); h 为普朗克常量^[23] (6.626276×10^{-34} J·s); c 为光速 (3×10^8 m·s⁻¹); 雷达系统的几何重叠因子为 $\xi(R)$, 假定 $\xi(R)$ 为1; η_0 为探测器的量子效率; $T_{\lambda_0}, T_{\lambda_1}$ 分别为激光波长 λ_0 和荧光波长 λ_1 光学系统的透过率, $T(\lambda_0, R), T(\lambda_1, R)$ 分别为激光波长 λ_0 和荧光波长 λ_1 在大气中传输的透过率; ΔR 为生物气溶胶云团的厚度(m); $N(R)$ 为生物气溶胶的平均浓度 (particles·L⁻¹); $\Delta\lambda$ 为生物荧光光谱线型的半高全宽; $\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda}(\lambda_0, \lambda)$ 为非弹性散射体的微分散射截面, 方程式为 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega d\lambda}(\lambda_0, \lambda) = \frac{\Psi(\lambda_0) A_1}{4\pi} L(\lambda_0, \lambda)$; $\Psi(\lambda_0)$ 为生物气溶胶粒子在激光脉冲波长 λ 处的荧光量子效率, A_1 为粒子平均作用截面积(m²), $L(\lambda)$ 为归一化的生物荧光光谱线型, 方程式为 $L(\lambda) = \frac{2}{\Delta\lambda} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} e^{-4 \ln 2 (\frac{\lambda - \lambda_1}{\Delta\lambda})^2}$.

3.2 荧光雷达方程中参数的确定

紫外激光脉冲在大气传输的过程中, 由大气分子消光系数 $\alpha_m(\lambda, R)$, 臭氧吸收系数 $\alpha_{ab}(\lambda, R)$ 及气溶胶消光系数 $\alpha_a(\lambda, R)$ 组成了不同距离 R 处的大气消光系数, 在均匀大气条件下, 大气透射率的表达式^[24] 为

$$T(\lambda, R) = e^{-[\alpha_m(\lambda, R) + \alpha_{ab}(\lambda, R) + \alpha_a(\lambda, R)]R}, \quad (2)$$

激光器发射出的脉冲在臭氧浓度为30 ppb的大气环境中传输时, 能量随距离变化如图2所示.

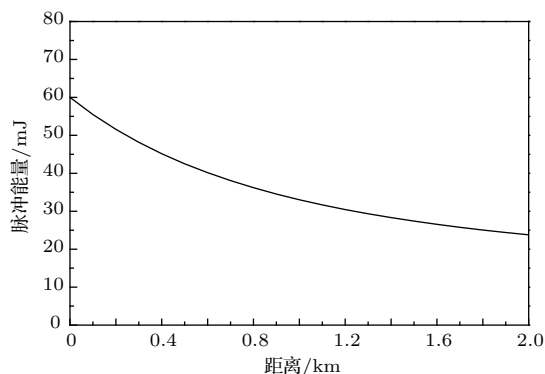


图2 脉冲能量随距离变化情况

Fig. 2. Curve of pulse energy with distances.

在水平情况下,当探测目标距离1 km,对生物气溶胶进行探测时,本征荧光光谱信号在大气中的透射率如图3所示.

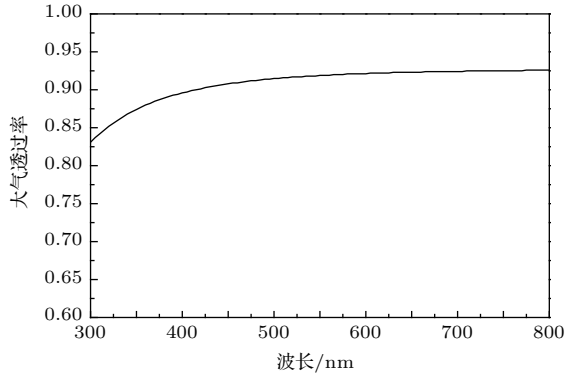


图3 大气透射率随荧光波长变化情况

Fig. 3. Curve of atmospheric transmittance with wavelengths.

选取荧光波长分别为490, 500, 510 nm时,得到归一化的荧光光谱线型 $L(\lambda)$ 曲线,如图4所示,任意波长的生物气溶胶的 $L(\lambda)$ 极值为0.094.

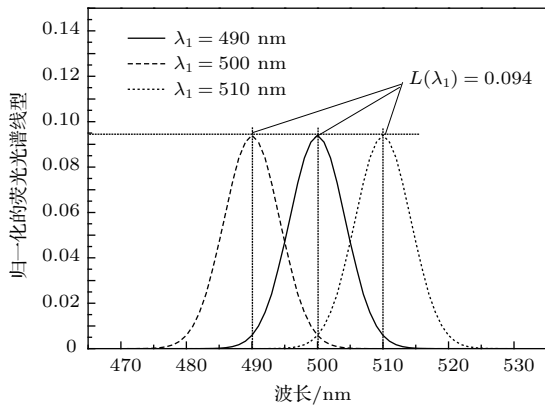


图4 归一化的荧光光谱线型函数

Fig. 4. Linear functions of the normalized fluorescence spectra.

3.3 荧光回波信号的仿真计算

假定生物气溶胶云团距离激光雷达1 km,云团厚度为20 m,生物气溶胶粒子的平均浓度为1000个颗粒/L, λ_0, λ_1 光学系统的透射率分别为0.8, 0.3,生物气溶胶本征荧光的量子效率为0.1,粒子平均作用截面积为 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ [25,26];各荧光雷达系统主要参数如表1所列.将 $T(\lambda_0, R), T(\lambda_1, R)$ 和 $L(\lambda)$ 的极值以及雷达系统的参数代入方程式(1)中,系统工作时间为1 s,最终,得到荧光信号的光子数 $N(\lambda_1, R)$ 随波长变化曲线,如图5所示.

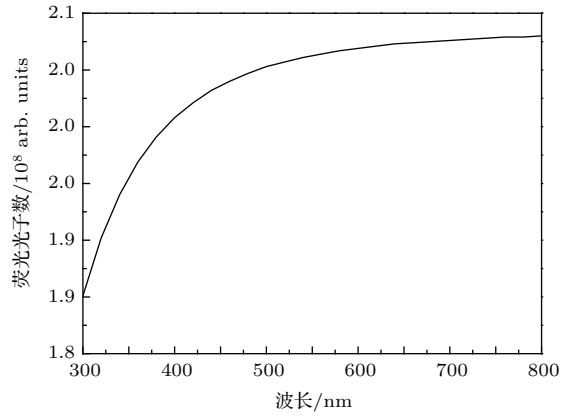


图5 生物气溶胶荧光信号光子数

Fig. 5. Photon numbers of the bioaerosol fluorescence.

表1 荧光雷达系统主要参数

Table 1. Main parameters of the fluorescence lidar.

| 定义 | 参考值 |
|----------------------------------|---------------------|
| 激光波长 λ_0/nm | 266 |
| 望远镜直径 D/mm | 254 |
| 脉冲能量 E_0/mJ | 60 |
| 望远镜视场角 θ/mrad | 0.5 |
| 脉冲重复频率 f/Hz | 10 |
| 粒子平均作用截面积 A_1/m^2 | 5×10^{-12} |
| 光学系统透射率 T_{λ_0} | 0.8 |
| 生物气溶胶云团厚度 $\Delta R/\text{m}$ | 20 |
| 光学系统透射率 T_{λ_1} | 0.3 |
| 本征荧光量子效率 $\Psi(\lambda_0)$ | 0.1 |
| 暗电流计数 CSP/s^{-1} | 500 |
| 探测器量子效率 η_0 | 0.2 |

4 生物气溶胶荧光雷达系统信噪比分析

4.1 荧光雷达系统噪声

由于大多数生物气溶胶的荧光光谱主要集中在300—800 nm之间[19],因此,系统在工作时,太阳辐射引起的噪声与生物气溶胶的荧光信号同时被采集.由基本的辐射理论得到太阳背景辐射光子数 $N_b(\lambda)$ 的表达式[27]为

$$N_b(\lambda) = S(\lambda) \frac{\lambda_1}{hc} \pi \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \eta_0 \Delta \lambda_1 A_0 T(\lambda) \Delta T, \quad (3)$$

式中, $S(\lambda)$ 为太阳背景光谱辐射率, θ 为望远镜视场角, $\Delta \lambda_1$ 为滤光片带宽, $T(\lambda)$ 为太阳背景辐射透射率, ΔT 为系统探测时长.与此同时,光电倍增管工作时的暗电流产生噪声信号也将影响系统性能.探测器的暗电流噪声 N_i 表示为:

$N_i = \text{CPS} \cdot \Delta T$, CPS为暗电流计数. 太阳背景辐射光子数, 如图6所示.

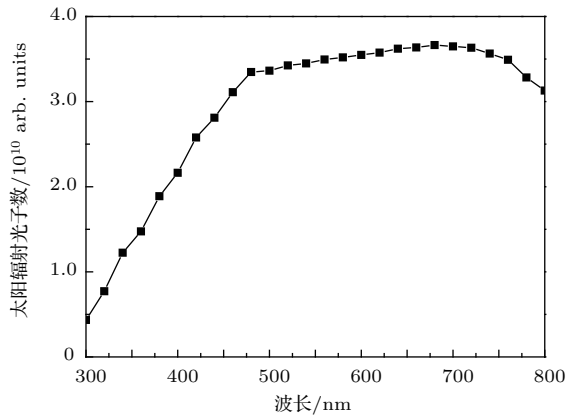


图6 太阳背景辐射光子数

Fig. 6. Photon numbers of the background radiation.

4.2 荧光雷达系统信噪比

生物气溶胶荧光雷达系统的信噪比表达式为

$$Y_{\text{-SNR}}(\lambda_1, R) = \frac{\sqrt{n_0} \cdot N(\lambda_1, R)}{\sqrt{N(\lambda_1, R) + 2[N_b(\lambda) + N_i]}} \quad (4)$$

在生物气溶胶浓度为1000个颗粒/L, 探测距离为1 km, 脉冲重复频率为10 Hz的情况下, 荧光雷达系统信噪比随波长变化曲线如图7所示.

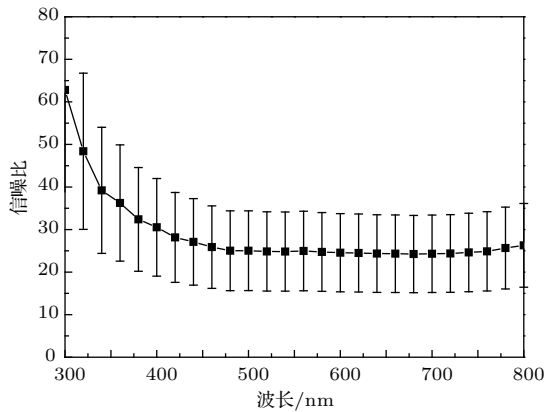


图7 荧光雷达系统信噪比

Fig. 7. Signal to noise ratio of the fluorescence lidar.

4.3 荧光雷达系统灵敏度分析

选定系统的信噪比为10时, 对荧光光谱信号进行分析^[25]. 如图8所示, 当探测距离为1.3, 1.4, 1.5 km时, 荧光波长在300—800 nm范围内的生物气溶胶能够被系统有效探测; 探测距离为1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2., 2.1 km时, 系

统能够探测生物气溶胶的荧光波长范围分别为300—420 nm, 300—370 nm, 300—350 nm, 300—330 nm, 300—320 nm和300—310 nm; 当距离为2.2 km时, 系统无法对生物气溶胶进行有效的探测. 说明随着距离的增加, 系统能够探测生物气溶胶的种类越来越少.

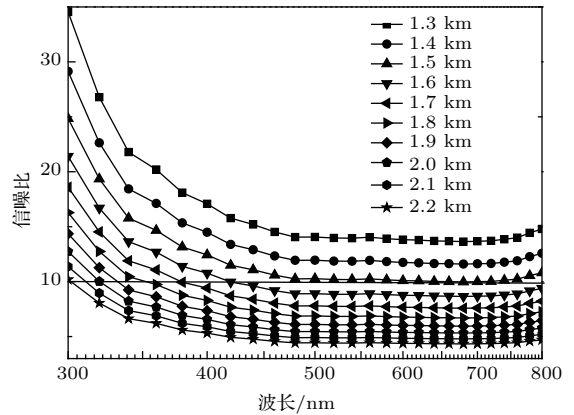


图8 不同距离情况下信噪比随荧光波长变化曲线

Fig. 8. Signal to noise ratio with distances.

如图9所示, 探测距离定义为1 km, 大气中生物气溶胶的粒子浓度为100个颗粒/L时, 系统已无法对生物气溶胶进行有效探测, 粒子浓度为200, 300个颗粒/L时, 系统能够探测到荧光波长分别为300—315 nm, 300—370 nm范围内的生物气溶胶, 粒子浓度为400个颗粒/L时, 系统能够探测到荧光波长为300—500 nm及760—800 nm范围内的生物气溶胶, 当粒子浓度大于500个颗粒/L时, 系统能够对荧光波长为300—800 nm范围内的任意生物气溶胶进行有效探测. 说明粒子浓度的变化能够影响系统对生物气溶胶的探测, 且在同等条件下, 荧光波长更短的生物气溶胶较容易被探测到.

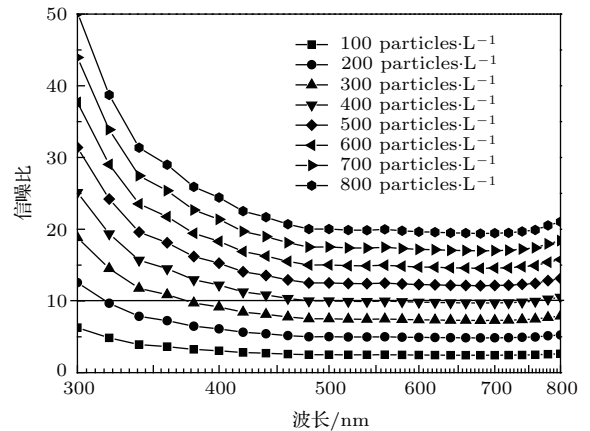


图9 不同浓度情况下信噪比随荧光波长变化曲线

Fig. 9. Signal to noise ratio with different concentrations.

在系统探测误差小于10%情况下,对生物气溶胶粒子浓度的最小分辨率进行数值分析.如图10(a)和图10(b)所示,当脉冲能量取值60 mJ,探测距离为0.1 km时,系统对荧光波长为350和600 nm的生物气溶胶探测时,粒子浓度的最小分辨率分别为2个颗粒/L和4个颗粒/L,最小分辨率的差值为2个颗粒/L,且随着距离的增加,差值逐

渐增大.当脉冲能量取值40 mJ时,粒子浓度的最小分辨率分别为3个颗粒/L和5个颗粒/L,最小分辨率的差值为2个颗粒/L;脉冲能量取值20 mJ时,粒子浓度的最小分辨率分别为6个颗粒/L和10个颗粒/L,最小分辨率的差值为4个颗粒/L,且随着脉冲能量的减弱和探测距离的增加,差值逐渐增大.

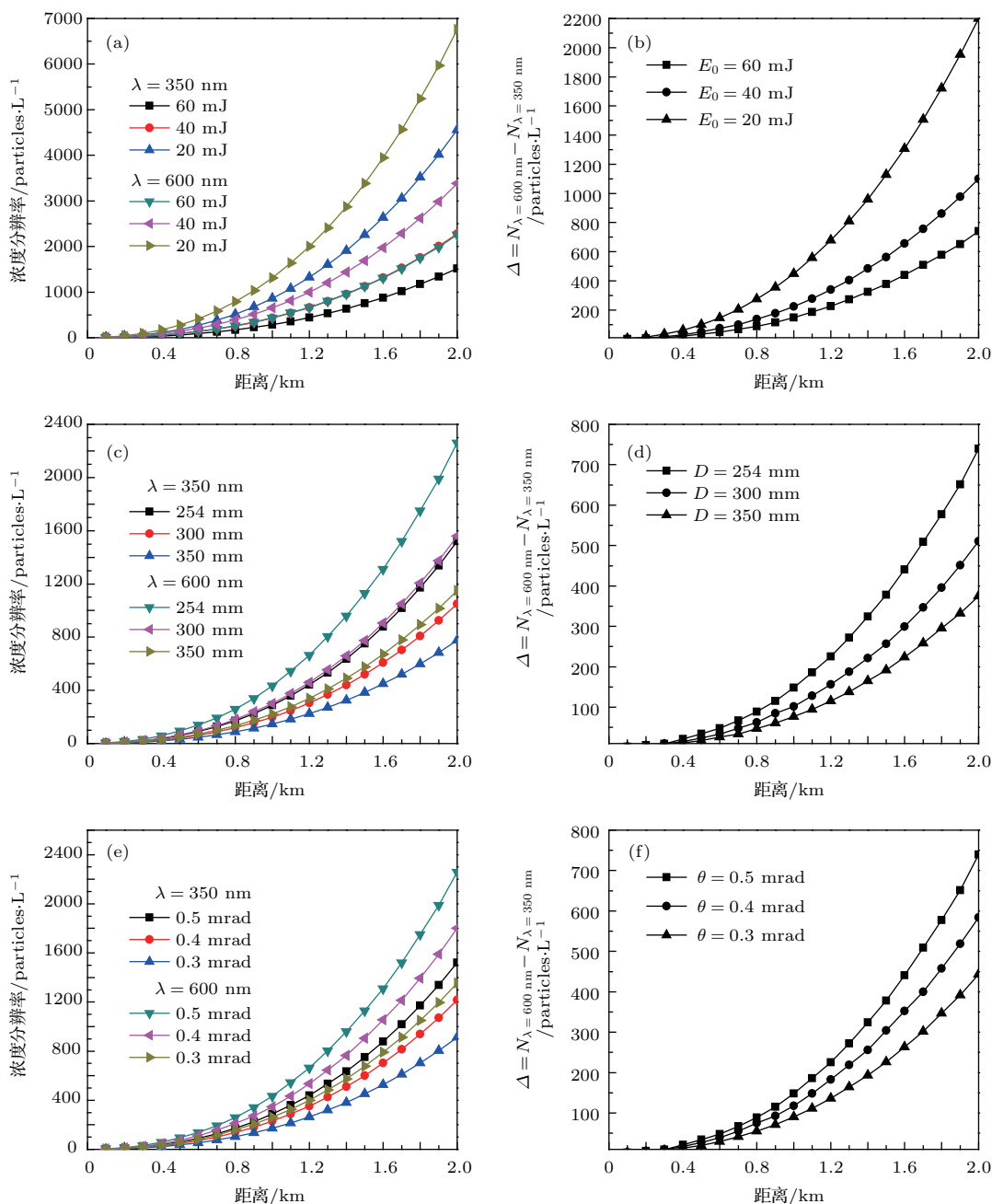


图10 (网刊彩色) 350与600 nm荧光探测波长 (a), (c), (e)为浓度分辨率随距离变化; (b), (d), (f)为浓度分辨率差值
 Fig. 10. (color online) Fluorescence wavelengths with 350 nm and 600 nm: (a), (c), (e) Concentration resolutions with distances; (b), (d), (f) the errors of concentration resolutions.

如图 10(c) 和图 10(d) 所示, 当望远镜直径取值 254 mm, 探测距离为 0.1 km 时, 粒子浓度的最小分辨率分别为 2 个颗粒/L 和 4 个颗粒/L, 最小分辨率的差值为 2 个颗粒/L, 且随着距离的增加, 差值逐渐增大. 当望远镜直径取值 300, 350 mm 时, 粒子浓度的最小分辨率分别为 1 个颗粒/L 和 2 个颗粒/L, 最小分辨率的差值为 1 个颗粒/L, 在望远镜直径增大的情况下, 随着探测距离的增加, 差值增大程度有所减缓.

如图 10(e) 和图 10(f) 所示, 当望远镜视场角取值 0.5 mrad, 探测距离为 0.1 km 时, 粒子浓度的最小分辨率分别为 2 个颗粒/L 和 4 个颗粒/L, 最小分辨率的差值为 2 个颗粒/L, 且随着距离的增加, 差值逐渐增大. 当视场角取值 0.4 mrad 时, 粒子浓度的最小分辨率分别为 1 个颗粒/L 和 3 个颗粒/L, 最小分辨率的差值为 2 个颗粒/L; 当视场角取值 0.3 mrad 时, 粒子浓度的最小分辨率分别为 1 个颗粒/L 和 2 个颗粒/L, 最小分辨率的差值为 1 个颗粒/L, 在望远镜视场角减小的情况下, 随着距离的增加, 差值增大程度有所减缓. 结果表明, 当本征荧光波长存在差异时, 系统对生物气溶胶粒子浓度的最小分辨率会存在差值; 并且荧光波长越短时, 激光雷达能够探测到更低浓度的生物气溶胶粒子.

综上所述, 由于大气中生物气溶胶的种类繁多, 本征荧光波长存在较大差异, 在同等条件下, 有些类型的生物气溶胶能够被激光雷达探测, 有些则不能; 并且在相同距离情况下, 系统对不同波长本征荧光的生物气溶胶进行探测时, 粒子浓度的最小分辨率存在差异. 通过对激光雷达系统的数值仿真, 验证了本征荧光能够对生物气溶胶的探测产生一定的影响.

5 结 论

激光雷达作为生物气溶胶有效探测工具之一, 已得到广泛关注, 如何提高生物气溶胶探测的准确性已成为研究的重点. 本文通过对紫外激光诱导荧光雷达系统模型的设计及仿真, 分析了本征荧光对生物气溶胶的探测距离及其粒子浓度最小分辨率的影响. 仿真结果表明, 探测距离为 0.1 km 时, 荧光波长为 350 和 600 nm 的生物气溶胶粒子浓度的最小分辨率分别为 2 个颗粒/L 和 4 个颗粒/L, 最小

分辨率的差值为 2 个颗粒/L, 并且随着探测距离的增大, 差值逐渐增大. 作为生物气溶胶自身的重要特性, 研究本征荧光对激光雷达性能的影响, 将为生物气溶胶粒子的类型预判提供重要参考. 未来将结合粒子的形状和尺寸进行更深入的分析 and 判别, 从而提高生物气溶胶粒子探测的准确度.

参考文献

- [1] Xu A, Xiong C, Zhang P, Liao X Q, Yang W, Zhao Y K, Huang H J 2013 *Acta Optica Sinica* **33** 130 (in Chinese) [徐傲, 熊超, 张佩, 廖小情, 杨巍, 赵勇凯, 黄惠杰 2013 光学学报 **33** 130]
- [2] Després V R, Huffman J A, Burrows S M, Hoose C, Safatov A S, Buryak G, Nowojsky J F, Elbert W, Andreae M O, Poschl U, Jaenicke R 2012 *Tellus B* **64** 15598
- [3] Heidi B, Heinrich G, Regina H, Anne K, Georg R, Franziska Z, Hans P 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1919
- [4] Franc G D, Demott P J 1998 *J. Appl. Meteorol.* **37** 1293
- [5] Sun J, Ariya P A 2006 *Atmos. Environ.* **40** 795
- [6] Pan Y L, Hill S C, Pinnick R G, Huang H, Bottiger J R, Chang R K 2010 *Opt. Express* **18** 12436
- [7] Gruber S, Matthias-Maser S, Jaenicke R 1997 *J. Aerosol Sci.* **28** S595
- [8] White C C, Kenny C M, Jennings S G 1999 *J. Aerosol Sci.* **30** 809
- [9] Artaxo P, Maenhaut W, Storms H, VanGrieken R 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 16971
- [10] Artaxo P, Storms H, Bruynseels F, Grieken R V, Maenhaut W 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 1605
- [11] Cai S Y, Zhang P, Zhu L L, Xie C K, Sun Z Y, Cheng W L, Zhao Y K, Huang H J 2012 *Acta Optica Sinica* **32** 119 (in Chinese) [蔡舒窈, 张佩, 朱玲琳, 谢承科, 孙征宇, 程伟林, 赵勇凯, 黄惠杰 2012 光学学报 **32** 119]
- [12] Wan W B, Hua D X, Le J, Yan Z, Zhou C Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 190702 (in Chinese) [万文博, 华灯鑫, 乐静, 闫哲, 周春燕 2015 物理学报 **64** 190702]
- [13] Buteau S, Simard J R, Roy G 2010 *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering* Toulouse, France, September 20–23, 2010 p7838
- [14] Ge L L, Ding L, Yan J, Wang Y P, Zheng H Y, Fang L 2013 *J. At. Mol. Phys.* **30** 125 (in Chinese) [葛琳琳, 丁蕾, 闫静, 王颖萍, 郑海洋, 方黎 2013 原子与分子物理学报 **30** 125]
- [15] Fang W H, Li Z W, Li Z L, Qu G N, Ouyang S L, Men Z W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 153301 (in Chinese) [房文汇, 里佐威, 李占龙, 曲冠男, 欧阳顺利, 门志伟 2012 物理学报 **61** 153301]
- [16] Øystein F, Rustad G, Skogan G 2012 *Biomed. Opt. Express* **3** 2964
- [17] Feng C X, Huang L H, Zhou G C, Han J, Zeng A J, Zhao Y K, Huang H J 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 2592

- (in Chinese) [冯春霞, 黄立华, 周光超, 韩洁, 曾爱军, 赵永凯, 黄惠杰 2010 中国激光 **37** 2592]
- [18] Change G Q, Song C Y, Wang L 2010 *Acta Opt. Sin.* **12** s100503 (in Chinese) [常冠钦, 宋存义, 汪莉 2010 光学学报 **30** s100503]
- [19] Pinnick R G, Hill S C, Niles S, Garvey D M, Pan Y L, Holler S, Chang R K 1999 *Field Anal. Chem. Technol.* **3** 221
- [20] Pan Y L, Huang H, Chang R K 2012 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **113** 2213
- [21] Pan Y L 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **150** 12
- [22] Megie G 1985 *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* **66** 686
- [23] Li S S, Zhang Z H, Zhao W, Li Z K, Huang S L 2015 *Chin. Phys. B* **24** 95
- [24] Wojtanowski J, Zygmunt M, Muzal M, Knysak P, Młodzianko A, Gawlikowski A, Traczyk M 2015 *Opt. Laser Technol.* **67** 25
- [25] Zou B F, Zhang Y C, Hu S X 2008 *Laser Technol.* **32** 287 (in Chinese) [邹炳芳, 张寅超, 胡顺星 2008 激光技术 **32** 287]
- [26] Joshi D, Kumar D, Maini A K, Sharma R C 2013 *Spectrochim. Acta A* **112** 446
- [27] Nakajima T Y, Imai T, Uchino O, Nagai T 1999 *Appl. Opt.* **38** 5218

Research and analysis on lidar performance with intrinsic fluorescence biological aerosol measurements*

Rao Zhi-Min Hua Deng-Xin[†] He Ting-Yao Le Jing

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 19 May 2016; revised manuscript received 18 June 2016)

Abstract

Biological aerosols which could cause diseases of human beings, animals and plants, are living particles suspended in the atmosphere. Ultraviolet laser induced fluorescence has been developed as a standard technique used to discriminate between biological and non-biological particles. As an effective tool of remote sensing, fluorescence lidar is capable of detecting concentration of biological aerosols with high spatial and temporal resolutions. Intrinsic fluorescence, one of the most important characteristics of biological aerosols, has quite a large effect on the performances of fluorescence lidar. To investigate the effects of intrinsic fluorescence on biological aerosols, we design an ultraviolet laser induced fluorescence lidar at an excited wavelength of 266 nm, with a repetition rate of 10 Hz. Fluorescence signals are collected by a Cassegrain telescope with a diameter of 254 mm, in which fluorescence spectra of 300–800 nm are mainly considered. A spectrograph and a multichannel photomultiplier tube (PMT) array detector are employed to achieve the fine separation and high efficiency detection of fluorescence signals. According to the present configuration, we perform a series of simulations to estimate the measurement range and the concentration resolution of biological aerosols, with a certain pulse energy. With a relative error less than 10%, theoretical analysis shows that designed fluorescence lidar is able to detect the biological aerosols within a range of 1.5 km at a concentration of 1000 particles·L⁻¹. When the detection distance enlarges to 2.1 km, detectable wavelength range is limited to 300–310 nm. In addition, the lidar is capable of identifying minimum concentrations of biological aerosols with 2 particles·L⁻¹ and 4 particles·L⁻¹ at fluorescence wavelengths of 350 nm and 600 nm, respectively, where the induced pulse energy is set to be 60 mJ and detected range 0.1 km. With setting energies of 40 mJ and 20 mJ, minimum concentrations of biological aerosols decrease to 3 particles·L⁻¹ and 6 particles·L⁻¹, respectively, at a fluorescence wavelength of 350 nm. The relative error of minimum concentration resolution is about 2 particles·L⁻¹, increasing rapidly with range. For a fluorescence wavelength of 600 nm, both the minimum concentration and the relative error show relatively high values, 5 particles·L⁻¹ at 40 mJ and 10 particles·L⁻¹ at 20 mJ, where the relative errors are found to be 2 particles·L⁻¹ and 4 particles·L⁻¹, respectively. The results prove that a shorter intrinsic fluorescence wavelength has a better effect on biological aerosol measurement. We believe that a proper intrinsic fluorescence wavelength will further improve the detection accuracy of biological aerosols.

Keywords: biological aerosols, intrinsic fluorescence, lidar, concentration resolution

PACS: 07.05.Fb, 07.05.Tp, 06.20.Dk, 02.70.Hm

DOI: 10.7498/aps.65.200701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275185, 41405028) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2015JQ4100).

[†] Corresponding author. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn