

大气对生物气溶胶激光雷达性能影响的仿真分析

苏博家^{1,2,3}, 董吉辉^{1,2,3*}, 杨荣^{1,2,3}, 陈春利^{1,2,3}, 陈涌^{1,2,3,4}, 李晓锋^{1,2,3,4}, 罗晓翩^{1,2,3}, 周鼎富^{1,2,3}¹西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;²激光雷达与器件技术四川省国防科技重点实验室, 四川 成都 610041;³中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室, 四川 成都 610041;⁴北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 生物气溶胶极易在大气中传播并引发大范围疾病感染, 利用生物荧光特异性的激光诱导荧光(LIF)雷达技术是实现生物气溶胶防区外侦测的有力手段。LIF 激光雷达是一种宽光谱系统, 受大气能见度和背景辐射的影响与窄光谱系统(如米散射激光雷达)有明显差异。为了评估 LIF 激光雷达在不同大气条件下的探测性能, 利用 Modtran5 对几种典型的大气能见度和背景辐射(或工作时段)的水平路径上的宽光谱背景辐射与大气传输透过率进行了仿真, 进而对不同大气条件下 LIF 激光雷达的探测性能进行了定量分析。仿真结果表明: 在相同的大气能见度条件下, 夜间的可探测距离要比白天高出 2~4 倍, 且能见度越好, 探测性能差异越大; 在相同的工作时段, 大气能见度良好时的可探测距离要比大气能见度较差时的高出 2~5 倍, 且夜间探测性能差异比白天大; 气溶胶生物性识别的可探测距离要比生物成分识别的可探测距离高出 1~2 倍, 且受大气条件的影响明显。

关键词 遥感; 生物气溶胶; 荧光激光雷达; 背景辐射; 大气能见度

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230751

1 引言

气溶胶是指悬浮在气体介质中的微小固态或液态颗粒组成的相对稳定的分散体系, 其粒径范围为 0.001~100 μm , 生物气溶胶则含有生物实体和碎片(细菌、病毒以及致敏花粉、霉菌孢子、蕈类孢子和寄生虫卵等)^[1-2]。小粒径的生物气溶胶粒子可以在空气中存在很长时间, 在传染病的传播途径中起着重要的媒介作用, 病原菌可通过附着气溶胶在空气中传播引起传染病的流行。人类自然活动、环境污染、污水处理等过程都会产生大量生物气溶胶。另外在军事领域, 生物气溶胶也是生物毒剂的主要作战形式, 生物毒剂具有成本低、毁伤范围大的特点, 被用于战场或恐怖袭击中的可能性很大。因此, 需要发展生物气溶胶的实时检测与提前预警技术手段^[2-5]。

基于激光与生物气溶胶粒子间的弹性和非弹性散射^[6]、激光诱导荧光(LIF)^[7-9]等物理效应的激光雷达技术可以提供关于气溶胶颗粒的尺寸、形状和成分信息并有非常快的响应速度, 更重要的是远距离非接触性检测使得安全性大幅提升^[10-11], 因而得到了国内外学者的广泛研究。国外自 20 世纪 90 年代起, 已陆续研发出了多种生物气溶胶侦测激光雷达, 如美国的 SR-

BSDS、JBSDS、Ares^[12], 加拿大的 SINBAHD、SR-BioSpectra、BioSense^[13], 英国的 MK1~MK4, 德国的 BALI^[14], 俄罗斯的可移动 LIF 激光雷达等^[15]。国内自 2010 年前后起, 军事医学科学院卫生装备研究所^[16]、中国科学院安徽光学精密机械研究所^[17]、北京理工大学^[18]、西安理工大学^[19]、兰州大学^[20]及西南技术物理研究所^[3]等单位先后开展了生物荧光激光雷达技术研究, 搭建了若干短程遥测样机。

LIF 激光雷达是一种宽光谱系统, 受大气能见度和背景辐射的影响与窄光谱系统(如米散射激光雷达)有明显差异。为了评估 LIF 激光雷达在不同大气条件下的探测性能, 本文利用 Modtran5 对几种典型的大气能见度和工作时段水平路径上的宽光谱背景辐射与大气传输透过率进行了仿真计算, 进而对不同大气条件下激发波长为 355 nm 的 LIF 激光雷达系统的总荧光和光谱可分辨荧光的信噪比(SNR)进行了仿真计算, 得到了 LIF 激光雷达系统的有效探测距离与大气能见度和工作时段的数量化关系。

2 LIF 激光雷达的基本原理

2.1 LIF 效应简述与实验验证

LIF 是一种光致发光效应。某些特定的介质在受

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2023-06-20; 录用日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2023-10-24

基金项目: 四川省科技计划(2022YFG0352)、北方激光研究院有限公司青年科技创新项目(K220042-003)

通信作者: j.h.dong@163.com

到紫外光照射后,处于平衡态的电子吸收特定波长的光子能量,由基态跃迁至不同激发态的不同振动能级上,而处于激发态的电子极不稳定,会通过辐射跃迁或无辐射跃迁的方式释放出多余能量^[21]。其中到达第一激发单线态的最低振动能级上的电子会在短时间($10^{-9}\sim 10^{-7}$ s)内通过辐射跃迁的方式发射一个光子回到基态,这个过程所发射的就是荧光^[22]。

基于 LIF 的基本原理,使来自激光器的激光照射到待研究样品,当激光的光谱与样品分子的吸收谱重叠时,被照射部分的分子将被激发发射荧光。因为被这样激发的唯一分子是那些处于相应跃迁的特定低能级的分子,所以激发对这个状态或这一组状态是具

有选择性的,同时发射的荧光波长由分子内部的能级决定,通过记录同一激发波长下不同荧光发射波长与荧光强度的函数可以得到荧光发射光谱。每一种物质都有其独特的荧光发射光谱,从而可以进行光谱识别、表征^[23]。我们利用 SmartFluo-Pro 三维荧光光谱仪进行了对应的实验验证,设置荧光激发波长为 355 nm,分别测量了还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)、核黄素、玫瑰花粉、色氨酸、油菜花粉、长白山松花粉共 6 种生物物质的荧光发射光谱。实验结果如图 1 所示,6 种不同的生物物质被激发的荧光发射光谱各有特点,故而可以基于 LIF 效应区分不同生物物质。

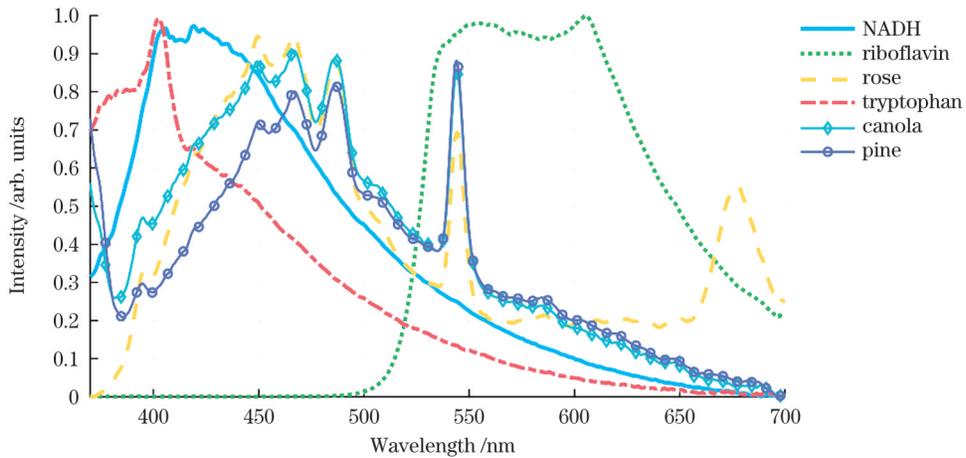


图 1 6 种生物物质由 355 nm 激光所激发的归一化荧光发射光谱

Fig. 1 Normalized fluorescence emission spectra of six biological substances excited by 355 nm laser

2.2 LIF 激光雷达基本组成

本文构建的用于探测大气中生物气溶胶的荧光激光雷达系统如图 2 所示。系统主要由激光发射单

元、光学接收单元、光电探测单元、信息处理单元和综合控制单元 5 个模块组成。激光发射单元采用 Nd:YAG 固体激光器作为发射光源,通过固态非线性倍

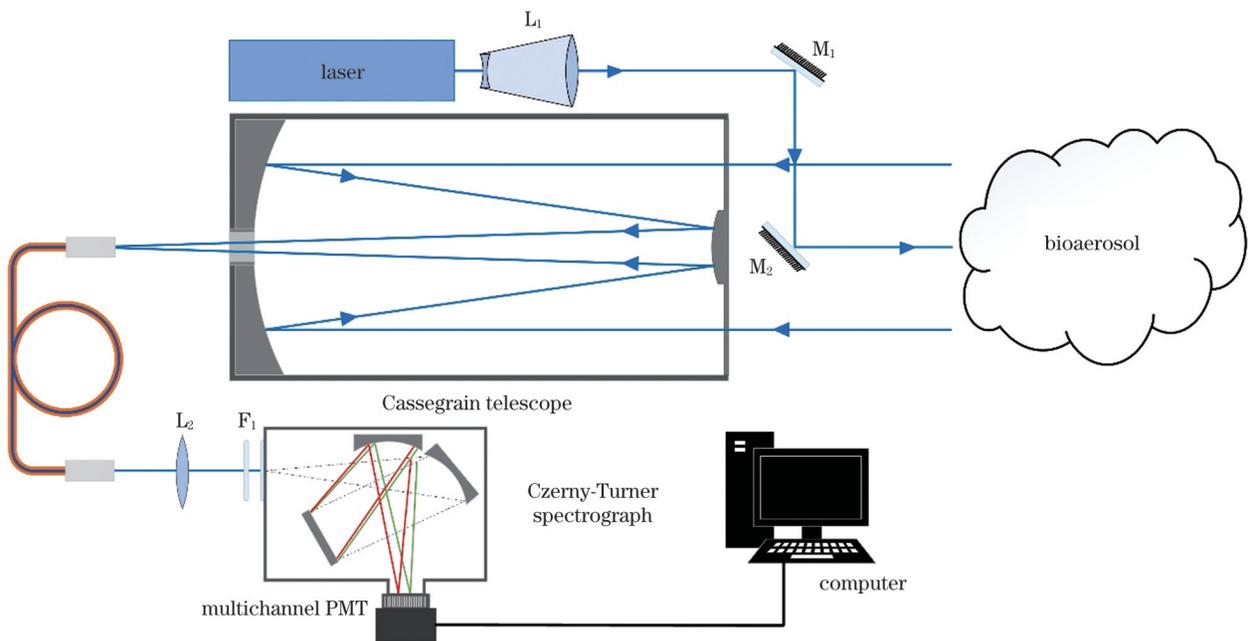


图 2 荧光激光雷达结构示意图

Fig. 2 Schematic of fluorescence lidar

频转换得到三倍频的 355 nm 波长的激光,经扩束镜 L_1 扩束后再由两个全反镜 M_1 、 M_2 反射后进入大气中。生物气溶胶的荧光效率与激发光谱有关,最佳的激发波长可以确定为 280 nm(芳香族氨基酸的荧光)和 340 nm(细胞代谢因子的荧光)^[23];然而没有恰好在这些波长工作的高功率脉冲激光器,因此选择附近最为接近的光谱是合理的。光学接收单元由一个卡塞格林望远镜来接收由生物气溶胶产生的生物荧光信号,再使用一根多模光纤,既可以实现望远镜接收视场的约束,也可以实现光路的柔性变向。光电探测单元则先由准直镜 L_2 对光纤光进行准直,再由宽带滤光片 F_1 过滤会被同时接收到的弹性散射光与其他波段的背景光,荧光成分进入 Czerny-Turner 光谱分光仪,其光谱内容在空间上将被分离,再由多通道光电倍增管(PMT)对不同的激发光谱波长的荧光信号进行光电转换。然后由信息处理单元使用高速采集卡进行数据采集并在计算机中进行数据处理。综合控制单元集成在计算机中,可以对系统各单元进行控制。

2.3 LIF 激光雷达原理方程

通过模拟激光与其激发的荧光信号在大气中传输

的过程,可以得到接收到的荧光回波信号的理论值。这个过程通常涉及到窄光谱激光穿过大气照射目标生物气溶胶、生物气溶胶的吸收和荧光发射、宽光谱荧光穿过大气返回等过程。荧光回波信号理论值的计算需要综合考虑这些因素。假设距离 R 远处的生物气溶胶是均匀的,则得到波长为 λ 的荧光回波信号的功率为^[7-11]

$$P(\lambda, R) =$$

$$\frac{1}{2} E_0 c \frac{A_0}{R^2} \varphi_0 \phi_0 \xi(R) T_0(\lambda_0, R) T_1(\lambda, R) \partial \sigma_{\text{LIF}}(\lambda) n, \quad (1)$$

式中: E_0 为激光器的单脉冲能量; c 为光速; A_0 为望远镜的有效面积; φ_0 和 ϕ_0 分别为望远镜的接收效率和光学组件的透过率; $\xi(R)$ 为雷达的几何重叠因子,在本系统中采用收发同轴的光路设计, $\xi(R) = 1$; λ_0 为激光器发射的激光波长; $T_0(\lambda_0, R)$ 和 $T_1(\lambda, R)$ 分别为波长 λ_0 和 λ 的光在大气中传输 R 距离的大气透过率; $\partial \sigma_{\text{LIF}}(\lambda)$ 为微分荧光散射截面; n 为粒子数体密度。

在对应探测通道的总光谱上进行积分,得到荧光激光雷达方程为

$$P(R) = \frac{1}{2} E_0 c \frac{A_0}{R^2} \varphi_0 \phi_0 \xi(R) T_0(\lambda_0, R) n \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_1(\lambda, R) \partial \sigma_{\text{LIF}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为探测通道光谱范围的下限和上限。

通过考虑系统信噪比对其进行性能分析。信噪比定位为系统接收到有效信号与系统噪声信号的比值,本系统中,在光电倍增管光阴极产生的电流信噪比^[24]为

$$R_{\text{SN}}^1 = \frac{I_s}{\sqrt{2eB(I_s + I_b + I_d)}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, R) \eta e \frac{\lambda}{hc} d\lambda}{\sqrt{2eB \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [P(\lambda, R) + S_b \Omega_0 A_0] \eta e \frac{\lambda}{hc} d\lambda + I_d \right\}}}, \quad (3)$$

式中: I_s 是荧光回波信号在 PMT 光阴极上产生的电流,可由激光雷达方程得到的回波能量计算得出; $\sqrt{2eB(I_s + I_b + I_d)}$ 是总的噪声电流,对于 PMT 来说其主要的噪声电流为散粒噪声^[25]; I_b 是大气背景辐射产生的电流,可以由基本的辐射理论得到; I_d 是 PMT 的暗电流噪声,由其本身的性能决定,为定值; η 是 PMT 的量子效率; e 是电子电荷; h 是普朗克常量; S_b 是接收视场角内的大气背景辐射亮度; Ω_0 为望远镜的接收视场角; A_0 为望远镜的接收面积。

对多个脉冲的回波信号进行累积并平均处理后,信噪比会相对提升。选择累积的脉冲数量为 N 时,信噪比 R_{SN}^N 为

$$R_{\text{SN}}^N = \frac{\sqrt{N} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, R) \eta e \frac{\lambda}{hc} d\lambda}{\sqrt{2eB \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [P(\lambda, R) + S_b \Omega_0 A_0] \eta e \frac{\lambda}{hc} d\lambda + I_d \right\}}}. \quad (4)$$

选定可以检测、识别生物气溶胶的极限最小信噪比,结合荧光激光雷达方程就可以得到荧光激光雷达的有效探测距离。

3 LIF 激光雷达大气辐射传输仿真分析

Modtran5 是一款用于大气辐射传输计算的仿真软件,可用来预测和模拟大气传输中的光学现象。它可以计算太阳辐射、地球表面反射和大气散射、吸收、反射等各种光学特性,并可模拟不同的大气条件下光的传播和衰减。光谱分辨率 0.2 cm^{-1} 。广泛应用于大气科学、环境监测、军事侦察、航空航天等领域。

为了获得可靠的大气透过率和大气背景辐射数据,我们对处于中纬度夏季的大气进行了一系列基于 Modtran5 大气传输模型的仿真计算,并选择了夏至日作为研究时间点。

3.1 荧光发射波段的大气背景辐射

荧光信号并不是荧光激光雷达所能探测到的唯一信号,大气背景辐射也会与荧光信号一起被接收,它是激光雷达的主要噪声源之一。地球大气背景辐射的主要来源包括地表和大气本身的热辐射,太阳辐射进入大气层时与大气分子、气溶胶和云等物质相互作用,并发生多次散射、吸收和反射而形成的太阳散射辐射,以及下垫面对太阳辐射的反射能量。其中大气对太阳光辐射的多次散射在激光雷达的背景噪声中占主导地位。本小节对不同工作时段及不同大气条件下 200~800 nm 波段的大气背景辐射进行仿真计算。气候条件选定为中纬度夏季,每种大气条件下都考虑了夏至

日的正午、黄昏、深夜三个时间点。

为了验证 Modtran5 的仿真结果,我们首先使用 StellarNet 公司制造的太阳光谱辐射度计(SolarRad)在成都夏季的一个晴天对正午的大气背景辐射进行了水平方向的测量,并与 Modtran5 仿真能见度 $W_{\text{vis}}=23$ km、夏至日正午水平方向的大气背景辐射进行对比。由于仪器测得的光谱精度为 1 nm,而由 Modtran5 仿真得到的光谱精度为 0.2 cm^{-1} ,直接对比两者数据难以体现相似性,故对仿真得到的太阳光谱数据进行积分,使其光谱分辨率降低至与仪器相同以方便对比,如图 3 所示。实验测量结果与仿真结果拟合程度很好,整体变化趋势相同,可以认为 Modtran5 的仿真结果是可信的。

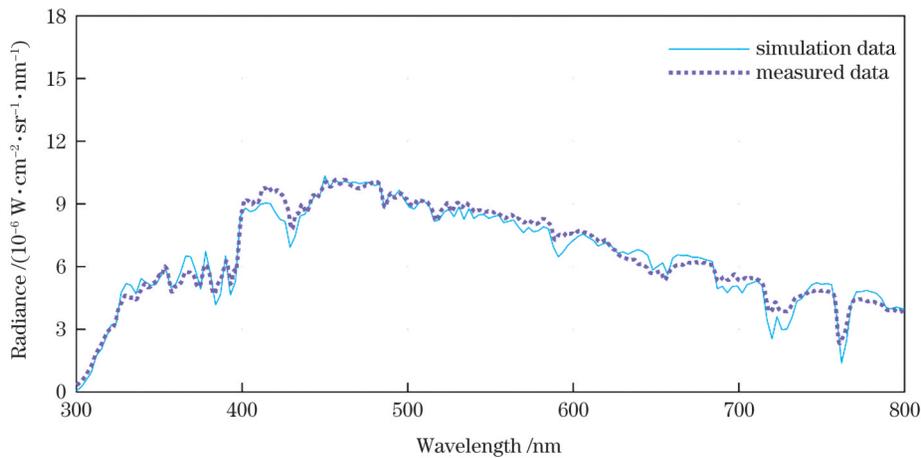


图 3 正午时分实测与仿真的水平方向大气背景辐亮度

Fig. 3 Measured and simulated horizontal atmospheric background radiance at noon

图 4~图 6 分别展示了夏至日正午、黄昏和深夜三个不同时间点在四种不同大气条件下,水平方向接收到的 200~800 nm 波段的大气背景辐亮度。无论是白天还是夜晚,晴天 ($W_{\text{vis}}=23$ km) 情况下的大气背景辐亮度总是最大的,且随着能见度的降低,水平方向接收到的大气背景辐亮度也会降低。因为当大气能见度较低时,大气中存在较多的颗粒物(如烟尘、雾霾等)或水汽、雾等会散射或吸收光线,使得水平方向接收到的

大气背景辐射更少。同时,对比 3 幅图像,大气背景辐射整体上在 400~500 nm 附近达到最高值。在同一大气条件下,正午太阳光的照射量最大,大气散射也最强,这时候的大气背景辐射也最强。而在黄昏时刻,太阳高度角变低,太阳光需要穿过更多的大气层,而随着传播距离的增加,散射和吸收对光的影响也会增强,使得光线变得更加模糊和弱化,从而太阳光总的传播距离也变短,使得近地的大气散射较弱,因此大气背景辐

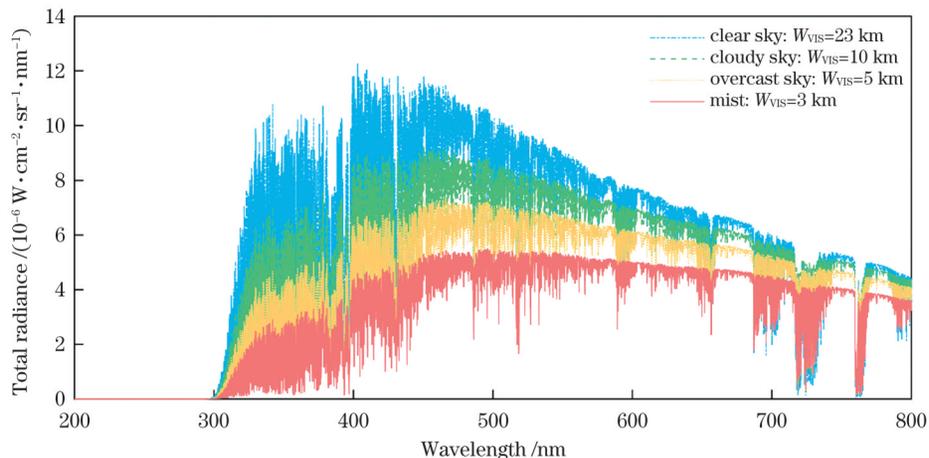


图 4 正午时分不同能见度下 200~800 nm 波段的大气背景辐亮度

Fig. 4 Atmospheric background radiance in 200~800 nm band at different visibility levels at noon

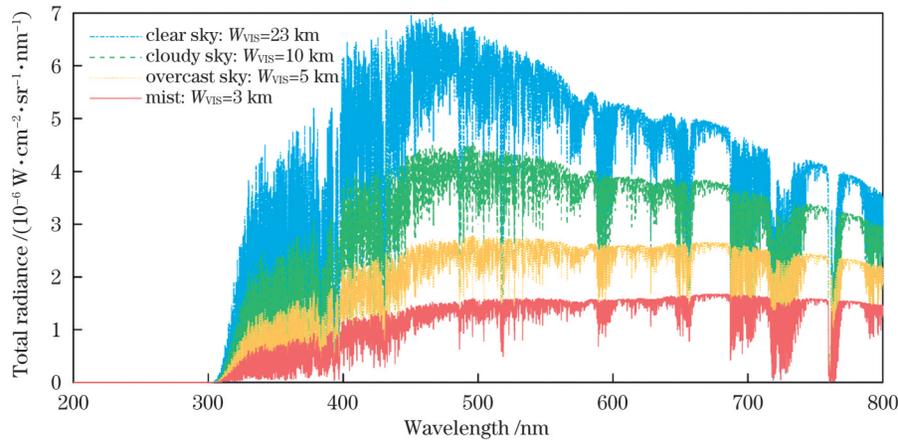


图 5 黄昏时分不同能见度下 200~800 nm 波段的大气背景辐亮度

Fig. 5 Atmospheric background radiance in 200~800 nm band at different visibility levels at dusk

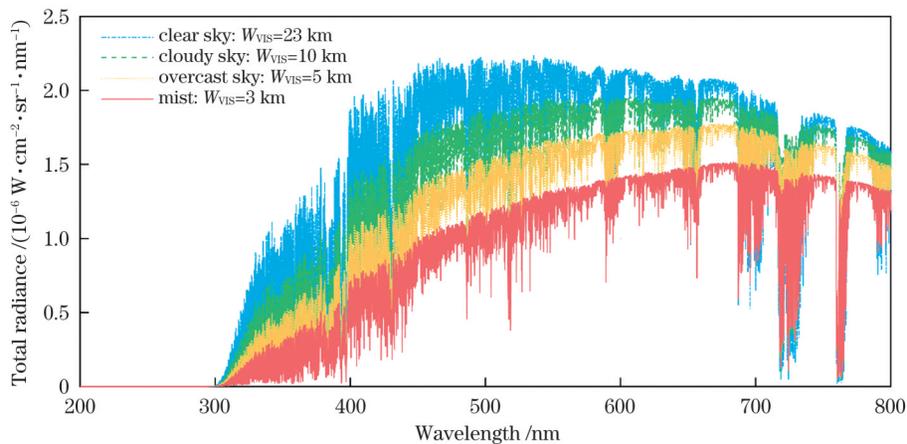


图 6 深夜时分不同能见度下 200~800 nm 波段的大气背景辐亮度

Fig. 6 Atmospheric background radiance in 200~800 nm band at different visibility levels at night

射强度会减弱,黄昏时刻相较正午时刻大气背景辐射强度小了近一半。到了晚上,由于太阳已经落山,大气背景辐射主要来自月亮和星光的反射和散射,因此整体强度下降了5个数量级。

3.2 宽光谱荧光的大气传输透过率

LIF 是一种非弹性散射,激发的荧光具有很宽的光谱,不同波长的荧光在大气中传输的衰减不一致,因

此需要对各个波长的大气透过率都进行仿真计算。本小节对不同大气条件下 200~800 nm 宽光谱的大气传输透过率进行了仿真计算。考虑了能见度分别为 23、10、5、3 km 四种天气类型,并设置了不同的传输距离进行仿真,计算得到了随传输距离变化的宽光谱的大气传输透过率。

激光器产生的窄光谱激光的波长为 355 nm。图 7 展

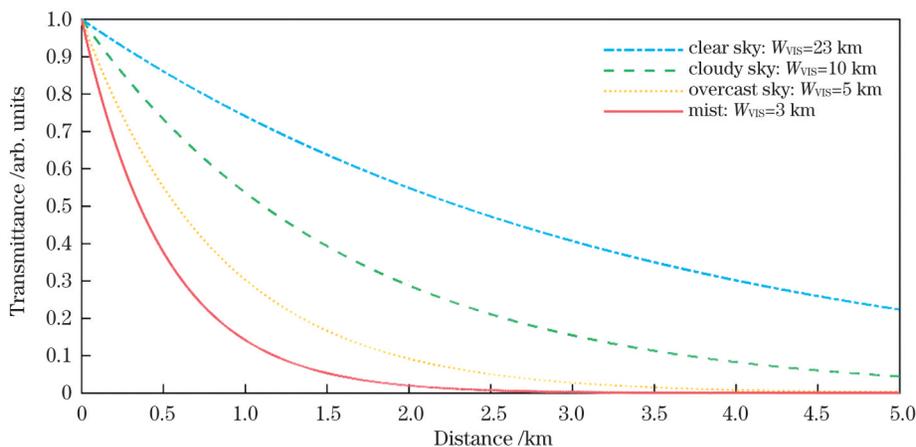


图 7 不同能见度下 355 nm 激光的大气透过率

Fig. 7 Atmospheric transmittance of 355 nm laser at different visibility levels

示了 355 nm 激光在不同能见度下传输 0~5 km 的大气透过率。

生物气溶胶吸收激光,产生的宽光谱荧光主要分布在可见光波段。图 8 展示了 200~800 nm 激光在不同能见度下的大气透过率随距离的变化情况。其中在 200~300 nm 波段,激光在大气中的衰减特别剧烈,即使是在晴天($W_{\text{vis}}=23$ km)大气条件下,该波段的光传输 0.5 km 大气透过率就已经衰减至 0 附近。这是因为臭氧的最强吸收带哈特莱带在 200~300 nm 波段,这个吸收带是由臭氧分子中的两个电子从基态

跃迁到第一激发态产生的,导致该波段的吸收强度非常高^[11]。同时,600~800 nm 的波长范围内各种大气条件下都存在比较明显的窄而深的吸收线,这主要是由水汽分子和氧分子引起的,在这个波段,水汽分子和氧分子都有一些离散的吸收线,如氧分子的 A 带吸收线和 B 带吸收线,这些吸收线主要是由氧分子的电子跃迁引起的^[11],但相对于其他波段来说,它们在这个波段中的吸收比较弱。同时随着能见度的降低,各光谱的大气透过率也都相应下降,但其整体趋势相同。

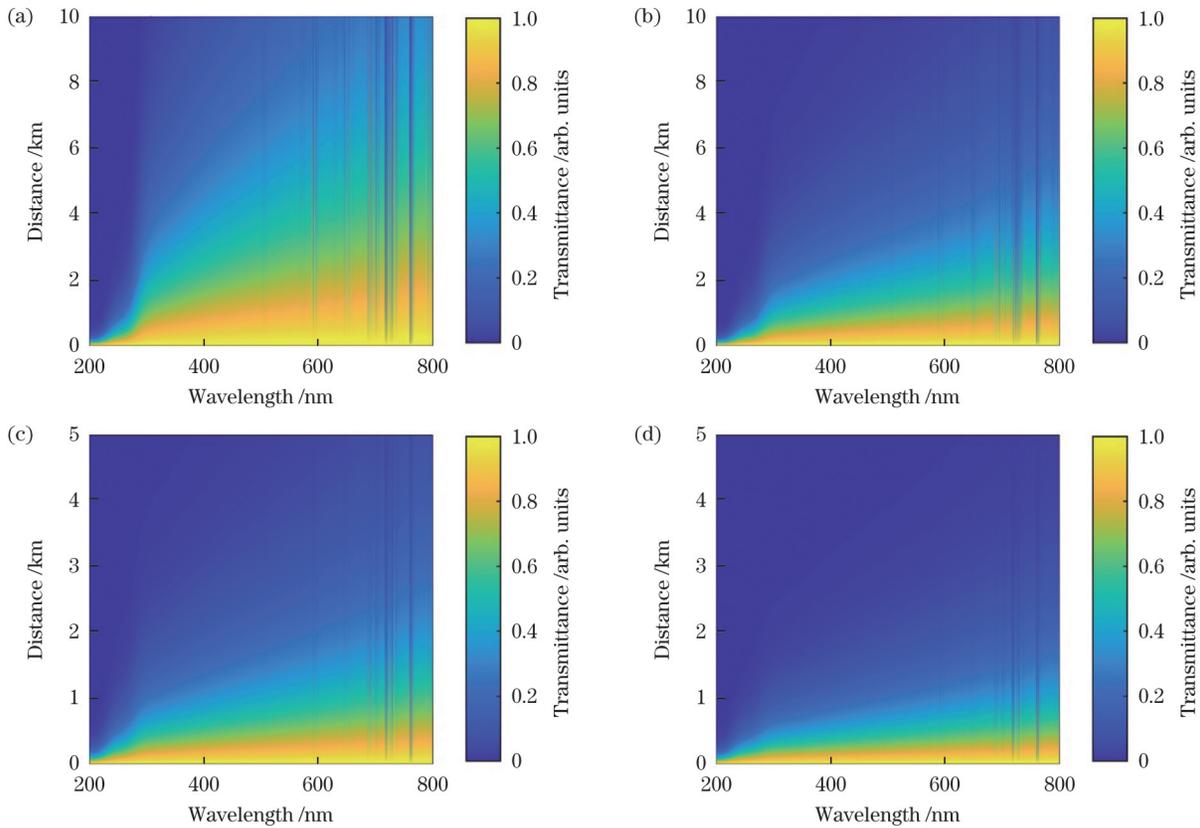


图 8 不同能见度下 200~800 nm 波段的大气透过率。(a) $W_{\text{vis}}=23$ km; (b) $W_{\text{vis}}=10$ km; (c) $W_{\text{vis}}=5$ km; (d) $W_{\text{vis}}=3$ km
Fig. 8 Atmospheric transmittance in 200-800 nm band at different visibility levels. (a) $W_{\text{vis}}=23$ km; (b) $W_{\text{vis}}=10$ km;
(c) $W_{\text{vis}}=5$ km; (d) $W_{\text{vis}}=3$ km

4 LIF 激光雷达探测性能仿真分析

生物荧光的发射波段通常集中在 300~600 nm^[26-27],且根据 2.1 节我们测量的 6 种生物物质的荧光也在这个波段,而由 355 nm 激光所激发的荧光波长大于激发波长,故检测光谱范围取 360~680 nm 波段,以 10 nm 范围为一个通道,共 32 个通道。根据文献^[28]中所展示的测量结果,苏云金芽孢杆菌(BT)的孢子、枯草杆菌(BG)的孢子、毒素模拟物卵清蛋白(OA)与噬菌体 MS2 单颗粒荧光微分散射截面均在 $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$ 范围内,因此我们选取 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 的荧光微分散射截面用于仿真计算。不失一般性,选定的 LIF 激光雷达的主要参数如表 1 所示。

荧光激光雷达用于探测生物气溶胶,必须要解决两个问题:气溶胶是否含有生物物质以及生物气溶胶含有的生物成分是什么。探测过程可分为检测与识别两个步骤。首先要对气溶胶进行生物性检测,结合多通道光电倍增管探测到的所有荧光信号得到总荧光强度以判断气溶胶是否含有生物物质;然后要具体识别生物气溶胶的生物成分,需要将每个通道接收的荧光信号单独计算,得到荧光发射光谱,该步骤需要每个通道的信噪比均达到要求。

4.1 基于总荧光强度的气溶胶生物性探测性能仿真分析

图 9 为 32 个通道探测的总荧光光谱系统的信噪比分别在四种大气条件下选择不同工作时段仿真结

表 1 LIF 激光雷达主要参数
Table 1 Main specifications of LIF lidar

Definition	Reference value
Laser wavelength λ_0 /nm	355
Pulse energy E_0 /mJ	100
Pulse frequency f /Hz	200
Single pulse duration τ /ns	10
Pulse accumulation time t /s	60
Beam diameter d /mm	0.9
Beam divergence angle θ_1 / μ rad	30
Telescope diameter D /mm	300
Telescope field of view θ_2 / μ rad	0.5
Photocathode dark current i_d /A	4×10^{-15}
PMT bandwidth B /MHz	40
PMT quantum efficiency η	0.2
Spectral width of detection channel $\Delta\lambda$ /nm	32×10
Optical component transmittance ϕ_0	0.5
Telescope reception efficiency φ_0	0.9
Total detection spectral range $\lambda_1 - \lambda_2$ /nm	360–680
Particle number concentration / L^{-1}	1000
Differential fluorescence scattering cross section $\partial\sigma_{LIF}$ /($cm^2 \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)	10^{-12}

果,可接受的信噪比理论极限取 $R_{SN}=10$,结合随距离变换的信噪比就可以得到系统进行生物性检测的有效探测距离^[29]。不同大气能见度对应了不同的大气背景辐射与大气传输透过率,同时大气背景辐射也受到工作时段的影响。在大气条件不变的情况下,在正午大气背景辐射最强的时段,荧光激光雷达对生物气溶胶的有效探测距离最短,大气能见度分别为 23、10、5、3 km 时,荧光激光雷达的有效探测距离为 2578、1888、1352、1027 m。正午之后,系统的有效探测距离开始提升。当工作时间选定为黄昏时,大气背景辐射的强度有所降低,但大气对激光和荧光的衰减不随工作时间而变化,大气能见度分别为 23、10、5、3 km 时,有效探测距离为 2760、2045、1486、1144 m。系统的探测性能在深夜达到最强,当工作时间选定为深夜时,大气背景辐射的强度已经下降到一个极低的量级,大气能见度分别为 23、10、5、3 km 时,有效探测距离达到了 9475、5517、3360、2293 m。不同能见度、不同工作时间气溶胶生物性探测的有效探测距离如表 2 所示。结果表明,大气背景辐射对系统的探测性能有严重的影响。白天全时段改变的只是太阳的高度角,因此正午与黄昏的有效探测距离差别不大;夜晚太阳光的消失使得大气背景辐射带来的噪声信号大幅度减少,有效探测距离至少提升了一倍以上,且在更高的大气能见度下,夜晚有效探测距离的提升幅度更大, $W_{vis} =$

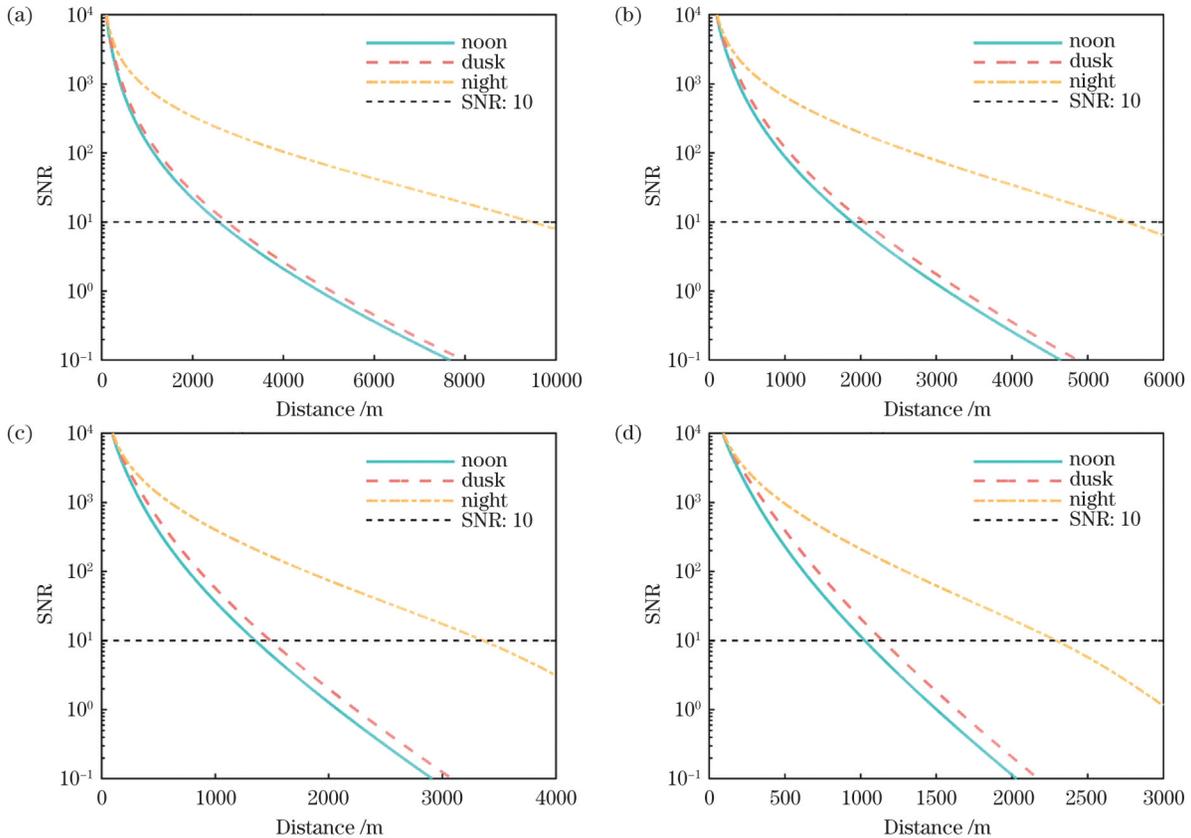


图 9 总荧光光谱不同工作时段系统的信噪比。(a) $W_{vis}=23$ km; (b) $W_{vis}=10$ km; (c) $W_{vis}=5$ km; (d) $W_{vis}=3$ km
Fig. 9 SNRs of systems with different operating hours of total fluorescence spectroscopy. (a) $W_{vis}=23$ km; (b) $W_{vis}=10$ km; (c) $W_{vis}=5$ km; (d) $W_{vis}=3$ km

23 km 的大气环境下夜晚有效探测距离提升到了正午时的 3.7 倍。同时大气能见度在各时段都会影响 LIF 激光雷达对生物气溶胶的探测性能。对比同一工作时间不同大气能见度下的信噪比曲线可知,信噪比斜率的绝对值随着大气能见度的提升而降低,与信噪比理论阈值的截距也相应地逐渐提升,大气能见度最高的 $W_{vis}=23$ km 情况下,各时段大气背景辐射的强度都是最高的,但良好的大气条件带来的更高的大气传输透过率对系统具有更强的正反馈,有效探测距离最远。

表 2 不同能见度、不同工作时段气溶胶生物性探测的有效探测距离

Table 2 Effective detection distance of aerosol biology detection at different visibility and operating hours

W_{vis} /km	Effective detection distance /m		
	Noon	Dusk	Night
23	2578	2760	9475
10	1888	2045	5517
5	1352	1486	3360
3	1027	1144	2293

4.2 基于光谱可分辨荧光强度的气溶胶生物成分识别性能仿真分析

对气溶胶的生物成分进行识别需要得到可分辨的荧光发射光谱,要求多通道光电倍增管每一个通道的信噪比都符合要求,同样 $R_{SN}=10$ 为其信噪比的理论极限。根据第 3 节的仿真结果,波长最短的通道 (360~370 nm) 接收的荧光信号的大气传输透过率最低,接收的背景辐射也在较高的水平。则对本系统而言,信噪比最小的通道是 360~370 nm 通道,选择该通道计算其信噪比随距离的变化情况,同样分别在四种大气条件下选择不同的工作时段进行仿真,如图 10 所示。不同能见度、不同工作时段气溶胶生物成分识别的有效探测距离如表 3 所示。结果表明,气溶胶生物成分识别性能受大气能见度与工作时间的影响趋势与气溶胶生物性探测性能相同,更好的大气能见度和夜晚都会提升其有效探测距离;但是 360~370 nm 单通道的信噪比斜率的绝对值相比总荧光光谱更大,气溶胶生物成分识别的有效探测距离更小,为气溶胶生物性探测的有效探测距离的一半左右。

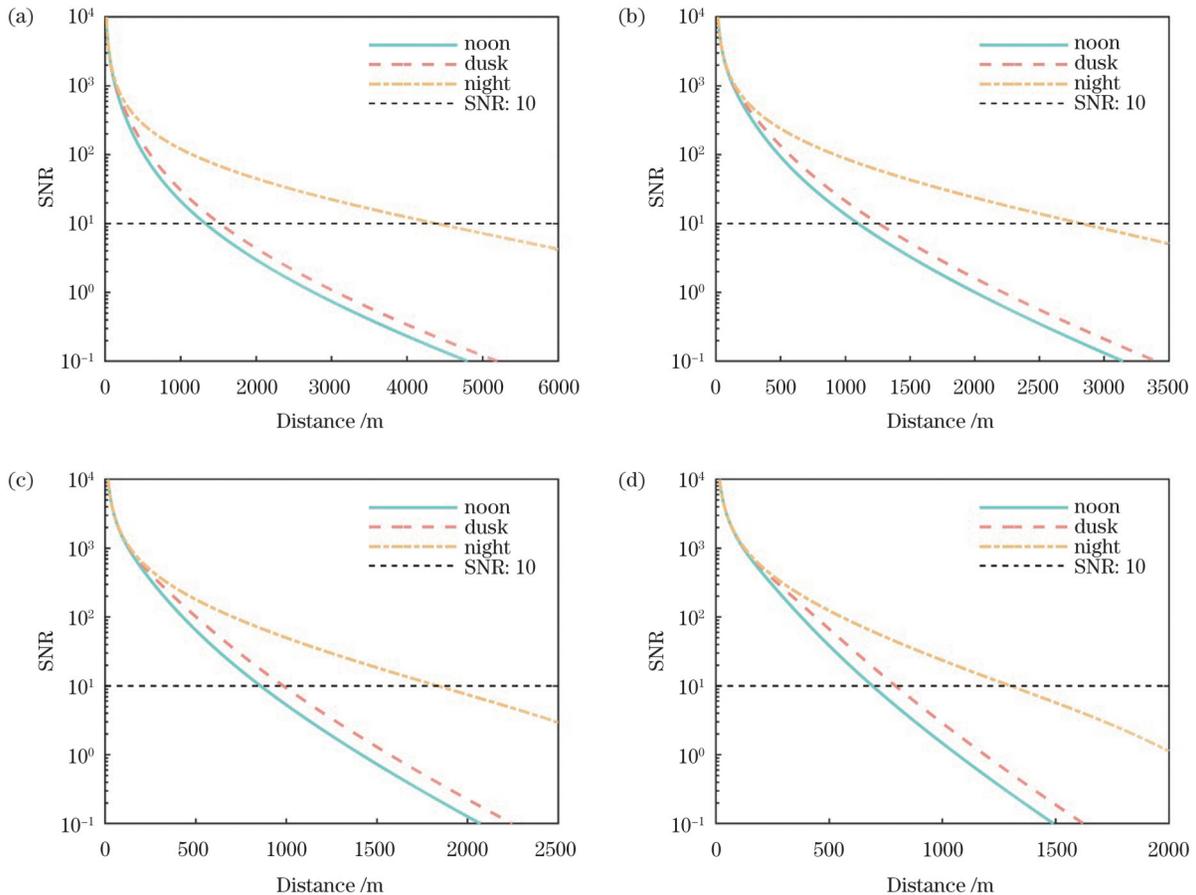


图 10 360~370 nm 通道不同工作时段系统的信噪比。(a) $W_{vis}=23$ km; (b) $W_{vis}=10$ km; (c) $W_{vis}=5$ km; (d) $W_{vis}=3$ km

Fig. 10 SNRs of systems with different operating hours of 360-370 nm channel. (a) $W_{vis}=23$ km; (b) $W_{vis}=10$ km; (c) $W_{vis}=5$ km; (d) $W_{vis}=3$ km

表3 不同能见度、不同工作时段气溶胶生物成分识别的有效探测距离

Table 3 Effective detection distance for aerosol biogenic component identification at different visibility and operating hours

$W_{\text{vis}} / \text{km}$	Effective detection distance / m		
	Noon	Dusk	Night
23	1327	1519	4388
10	1098	1257	2824
5	858	983	1836
3	691	793	1300

5 结 论

利用生物荧光特异性的 LIF 激光雷达是对生物气溶胶进行防区外侦测的有效手段。本文为了分析系统在不同大气条件下的性能,针对几种典型的大气能见度和工作时段,仿真计算了水平路径上宽光谱背景辐射与大气传输透过率。再对系统的信噪比进行数值计算,通过标定实现气溶胶生物性检测与气溶胶生物成分识别两项功能需要满足的条件,得出对应功能的有效探测距离。结果表明,大气条件会在很大程度上影响系统的探测性能,大气能见度越高,系统的有效探测距离就越远,对比 $W_{\text{vis}}=23 \text{ km}$ 与 $W_{\text{vis}}=3 \text{ km}$ 两种大气环境,不同工作时段其有效探测距离相差 2~4 倍。系统的工作时段对探测性能的影响同样很大,白天系统的探测性能较差且不同时段相差较小,而夜晚由于大气背景辐射的强度大幅度降低,系统的有效探测距离普遍提升一倍以上,且大气能见度越高提升幅度越大, $W_{\text{vis}}=23 \text{ km}$ 时夜晚有效探测距离是白天的 3.7 倍;同时,基于总荧光强度的气溶胶生物性检测功能的有效探测距离均高于基于光谱可分辨荧光强度的气溶胶生物成分识别功能,且其受大气条件的影响更显著,良好的大气条件将给气溶胶生物性探测功能带来更高的提升。

参 考 文 献

- [1] Li Y, Leung G M, Tang J W, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment: a multidisciplinary systematic review[J]. *Indoor Air*, 2007, 17(1): 2-18.
- [2] Jonsson P, Olofsson G, Tjörnhage T. Bioaerosol detection technologies[M]. New York: Springer, 2014.
- [3] 杨荣,董吉辉,杨泽后,等.生物气溶胶激光远程侦测技术进展[J]. *激光杂志*, 2023, 44(1): 1-7.
Yang R, Dong J H, Yang Z H, et al. Development of laser remote detection technology for biological aerosols[J]. *Laser Journal*, 2023, 44(1): 1-7.
- [4] 陈雪琴,李珊,张明顺,等.生物气溶胶研究进展[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(6): 783-787, 792.
Chen X Q, Li S, Zhang M S, et al. Research progress of bioaerosols[J]. *Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences)*, 2020, 40(6): 783-787, 792.
- [5] 魏兰芬,张磊,许澈,等.生物气溶胶粒径分布及稳定性研究[J]. *中国消毒学杂志*, 2011, 28(2): 158-160.
Wei L F, Zhang L, Xu J, et al. Research on distribution of particle size and stability of bio-aerosol[J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 2011, 28(2): 158-160.
- [6] 史亚龙,张永科,陈涌,等.大气气溶胶粒子粒径分布激光遥测研究进展[J]. *激光杂志*, 2023, 44(2): 1-7.
Shi Y L, Zhang Y K, Chen Y, et al. Research progress on laser telemetry of atmospheric aerosol particle size distribution[J]. *Laser Journal*, 2023, 44(2): 1-7.
- [7] 饶志敏,华灯鑫,何廷尧,等.双波长荧光雷达探测大气生物气溶胶的性能分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(9): 2804-2808.
Rao Z M, Hua D X, He T Y, et al. Performance analysis of double-wavelength fluorescence lidar in detecting atmospheric biological aerosols[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(9): 2804-2808.
- [8] 景敏,华灯鑫,乐静.激光诱导荧光雷达探测系统仿真研究[J]. *应用光学*, 2017, 38(1): 131-135.
Jing M, Hua D X, Le J. Simulation of laser induced fluorescence lidar detecting system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 131-135.
- [9] 邹炳芳,张寅超.多波长荧光激光雷达测生物气溶胶的数值模拟计算[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S3): 262-267.
Zou B F, Zhang Y C. Multi-wavelength fluorescence lidar detection of bioaerosols[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 262-267.
- [10] Wojtanowski J, Zygmunt M, Muzal M, et al. Performance verification of a LIF-LIDAR technique for stand-off detection and classification of biological agents[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 67: 25-32.
- [11] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2002.
- [12] Schmitt R L, Sickafoose S M, Johnson M S, et al. Remote sensing for bio-aerosol detection[R]. Albuquerque: Sandia National Lab, 2015.
- [13] Buteau S, Rowsell S. Biological material detection identification and monitoring: combining point and standoff sensors technologies [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9995: 99950B.
- [14] Hopkins R J, Barrington S J, Castle M J, et al. UV-LIF lidar for standoff BW aerosol detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7484: 748409.
- [15] Gritsuta A N, Klimkin A V, Kokhanenko G P, et al. Mobile multi-wavelength aerosol lidar[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(24): 9400-9414.
- [16] 杨子健,陈锋,李抄,等.生物气溶胶激光遥测系统光源关键参数优化[J]. *军事医学*, 2015, 39(8): 577-581, 586.
Yang Z J, Chen F, Li C, et al. Key optimization of light source parameters of lidar system for bioaerosol detection[J]. *Military Medical Sciences*, 2015, 39(8): 577-581, 586.
- [17] 徐傲,熊超,张佩,等.基于本征荧光测量的双通道生物气溶胶检测技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812005.
Xu A, Xiong C, Zhang P, et al. Research on dual-channel detection technology of bio-aerosols with intrinsic fluorescence measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812005.
- [18] 李保卫,陈思颖,张寅超,等.荧光-米偏振激光雷达系统定标[J]. *光学技术*, 2019, 45(5): 590-595.
Li B W, Chen S Y, Zhang Y C, et al. The calibration of a fluorescence-Mie polarization lidar system[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(5): 590-595.
- [19] 王强,何廷尧,华灯鑫.不同紫外波段激发生物气溶胶荧光雷达系统性能分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 1201002.
Wang Q, He T Y, Hua D X. Performance analysis of fluorescence lidar with different excited wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1201002.
- [20] Huang Z W, Huang J P, Li W R, et al. Multi-excitation wavelength spectrometer fluorescence laser radar system: US20220163392[P]. 2022-05-26.
- [21] Kinsey J L. Laser-induced fluorescence[J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 1977, 28: 349-372.

- [22] Wlodarski M, Kaliszewski M, Kwasny M, et al. Fluorescence excitation-emission matrices of selected biological materials[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6398: 639806.
- [23] 刘喆, 孟辉, 张永彬, 等. 基于 LLE 与 Gold-SA-SVM 的海藻三维荧光光谱门类识别[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0430001.
Liu Z, Meng H, Zhang Y B, et al. Category recognition of three-dimensional fluorescence spectra of algae based on LLE and gold-SA-SVM[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0430001.
- [24] 邓潘, 张天舒, 陈卫, 等. 大气探测激光雷达噪声比例因子及信噪比的估算[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S130003.
Deng P, Zhang T S, Chen W, et al. Estimating noise scale factor and SNR of atmospheric lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): S130003.
- [25] Agishev R, Gross B, Moshary F, et al. Simple approach to predict APD/PMT lidar detector performance under sky background using dimensionless parametrization[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(8): 779-796.
- [26] Pan Y L. Detection and characterization of biological and other organic-carbon aerosol particles in atmosphere using fluorescence [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 150: 12-35.
- [27] Joshi D, Kumar D, Maini A K, et al. Detection of biological warfare agents using ultra violet-laser induced fluorescence LIDAR [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2013, 112(4): 446-456.
- [28] Manninen A, Putkiranta M, Saarela J, et al. Fluorescence cross sections of bioaerosols and suspended biological agents[J]. Applied Optics, 2009, 48(22): 4320-4328.
- [29] Shoshanim O, Baratz A. Daytime measurements of bioaerosol simulants using a hyperspectral laser-induced fluorescence LIDAR for biosphere research[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104392.

Simulation Analysis of Atmospheric Effects on Bioaerosol Lidar Detection Performance

Su Bojia^{1,2,3}, Dong Jihui^{1,2,3*}, Yang Rong^{1,2,3}, Chen Chunli^{1,2,3}, Cheng Yong^{1,2,3,4},
Li Xiaofeng^{1,2,3,4}, Luo Xiaopian^{1,2,3}, Zhou Dingfu^{1,2,3}

¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, Sichuan, China;

²Lidar and Device Laboratory of Sichuan, Chengdu 610041, Sichuan, China;

³Key Laboratory of Laser Device Technology, China North Industries Group Corporation Limited, Chengdu 610041, Sichuan, China;

⁴College of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract

Objective Bioaerosols are extremely easy to spread in the atmosphere and cause widespread disease infections, and a large number of bioaerosols are produced by natural human activities, environmental pollution, and sewage treatment processes. In addition, in the military field, bioaerosols are also the main combat form of biological agents, which have the characteristics of low cost and large destructive range and are used in battlefield or terrorist attacks with high possibility. Therefore, there is a need to develop technical means for real-time detection and early warning of bioaerosols. Lidar technology based on physical effects such as elastic and inelastic scattering between laser and bioaerosol particles, as well as laser-induced fluorescence (LIF), can provide information about the size, shape and composition of aerosol particles and has very fast response, and more importantly, long-range non-contact detection makes the safety significantly improved. So it has gained extensive research from scholars at home and abroad. LIF lidar is a broad-spectrum system, which is affected by atmospheric visibility and background radiation. It is obviously different from narrow-spectrum systems such as Mie scattering lidar. Different atmospheric conditions can affect the detection performance of LIF lidar, and we hope to quantify the influences.

Methods In order to evaluate the detection performance of LIF lidar under different atmospheric conditions, a LIF lidar system is designed, and the formula of the system signal-to-noise ratio (SNR) is given. Then the simulation of atmospheric radiation transmission is started, and the broad-spectrum background radiation and atmospheric transmission transmittance on the horizontal path of several typical atmospheric visibility and background radiation (or operating hours) conditions are carried out using Modtran5. Finally, the parameters of LIF lidar are set, and then the signal-to-noise ratio of LIF lidar is simulated numerically according to the broad-spectrum background radiation and atmospheric transmission transmittance of different atmospheric conditions obtained in the previous step, and the variation function of signal-to-noise ratio with distance is obtained. The system works for detecting whether the aerosol contains biological substances and then for identifying biological aerosol species at two levels of detection needs. The simulation analysis is carried out separately.

Results and Discussions The fluorescence emission spectra of 355 nm light excitation of six biological substances are measured (Fig. 1), which verify the basic principle of LIF lidar that spectral discrimination can be performed based on the characteristic fluorescence emission spectra of various biological substances. Then the real-world atmospheric background radiation is measured, and the comparison of the measured real-world atmospheric background radiation with the simulation results (Fig. 3) fits well, proving that the simulation results of Modtran5 are credible. Subsequently, the simulated broad-spectrum background radiation and atmospheric transmission transmittance on the horizontal path under different atmospheric conditions (Figs. 4, 5, 6, and 8) are

obtained to provide sufficient atmospheric data for the following simulation of the system performance. Finally, the signal-to-noise ratio of the total fluorescence spectroscopy system (Fig. 9) and the that of the 360–370 nm channel system (Fig. 10) are calculated. The results show that the atmospheric conditions largely affect the detection performance of the system: the higher the atmospheric visibility, the longer the effective detection distance of the system. Comparing the two atmospheric environments of visibility of 23 km and 3 km, the difference in the effective detection distance for different working hours is 2–4 times. The working hours of the system also have a great impact on the detection performance. The detection performance of the system during daytime is poor and the difference between different time periods is small, while the effective detection distance of the system is generally increased (at least doubling) at night because the intensity of the atmospheric background radiation is greatly reduced, and the higher the atmospheric visibility, the larger the increase. Under the visibility of 23 km, the effective detection distance at night is 3.7 times that at the daytime. At the same time, the effective detection distance of the aerosol biological detection based on the total fluorescence intensity is higher than that of the aerosol biological component identification based on the spectrally distinguishable fluorescence intensity, and the former is more significantly affected by atmospheric conditions, i.e., good atmospheric conditions will bring higher improvement to the aerosol biological detection function.

Conclusions In this paper, the detection performance of LIF lidar under different atmospheric conditions is evaluated through simulations. The LIF lidar is suitable for biofluorescence measurements at night because of the high atmospheric background radiation intensity in the fluorescence band. The decrease of atmospheric visibility leads to the decrease of background radiation intensity and also the decrease of transmittance of broad fluorescence spectrum, which in turn leads to the decrease of LIF lidar detection performance, but the influence is far less than the effect of changing operating hours between daytime and night. The most suitable working environment for LIF lidar is the night with high visibility.

Key words remote sensing; bioaerosol; fluorescence lidar; background radiation; atmospheric visibility