

激光诱导生物气溶胶荧光雷达的设计与数值仿真

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, 陕西 西安 710048

摘要 为了评估激光诱导荧光雷达对生物气溶胶粒子的有效探测距离及随生物气溶胶浓度变化的敏感性,在阐述生物气溶胶探测原理的基础上,设计了一台激光诱导荧光雷达。该雷达选用波长为 355 nm 的二极管抽运的 Nd:YAG 固体激光器作为激励光源,基于脉冲能量、脉冲数量、滤光片带宽、望远镜口径、接收视场角以及生物气溶胶粒子荧光非弹性散射截面等主要参数,对生物气溶胶荧光回波信号的信噪比进行数值仿真。仿真结果表明,生物气溶胶粒子的质量分数为 10^{-12} 时,在探测误差小于 10% 的情况下,系统在白天和夜晚的有效探测距离分别可达 1.0 km 和 7.8 km;而在探测距离定义为 0.5 km 时,系统对生物气溶胶质量分数的最小分辨能力,白天和夜间分别为 1.8×10^{-13} 和 1.0×10^{-14} 。仿真结果有利于了解激光诱导荧光雷达系统的最优参数设定和最佳的实验环境,进而实现对生物气溶胶的有效探测。

关键词 测量; 激光诱导荧光; 生物气溶胶; 系统仿真; 信噪比

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1028001

Design and Simulation of Laser Induced Bio-Aerosols Fluorescence Lidar

Rao Zhimin Hua Dengxin He Tingyao Le Jing

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract In order to evaluate the effective detection distance of bio-aerosols and sensitivity to the concentration of the bio-aerosols for the laser induced bio-aerosols fluorescence lidar. On the basis of elaborating lidar measuring principle, a fluorescence lidar employing a Nd: YAG laser at 355 nm as a transmitter is designed for biological aerosol concentration detection. The signal-to-noise ratio (SNR) of bio-aerosols fluorescence echo signal is simulated based on the main parameters, such as pulse energy, pulse number, filter bandwidth, diameter of telescope, field of view of telescope and inelastic scattering cross-section of bio-aerosols particles. With the uncertainty of less than 10%, theoretical analysis results show that the system is capable of measuring bio-aerosols with a mass fraction of 10^{-12} up to an effective detection distance of 1.0 km and 7.8 km at daytime and nighttime, respectively. Moreover, with a certain detection rang of 0.5 km, the fluorescence lidar is able to detect bio-aerosols at a minimum mass fraction of 1.8×10^{-13} at daytime and 1.0×10^{-14} at nighttime. Simulated results are helpful to understand the optimal parameters of laser induced fluorescence lidar and also the best experimental environment of the system, and then realize effective detect to bio-aerosols.

Key words measurement; laser induced fluorescence; bio-aerosol; system simulation; signal-to-noise ratio

OCIS codes 280.1100: 300.2530: 120.1880: 260.2510

1 引 言

大气中普遍存在生物气溶胶,其种类繁多并具有生命活性,包括空气中的细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉孢子以及具有生命活性的微小粒子,如动植物碎裂的分解体等^[1-2]。生物气溶胶对人类和动物的生存有很大

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275185,41405028)

作者简介: 饶志敏(1987—),男,博士研究生,主要从事激光雷达大气遥感技术方面研究。E-mail:1805695165@qq.com

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光雷达大气遥感技术、光电检测技术方面的研究。

E-mail:xauthdx@163.com

的隐患^[3],细菌、病毒以及其他生物病菌能够在大气中繁殖和传播,其存活时间越长危害性越大^[4]。此外,生物气溶胶还是生物武器主要的投放形式^[5],而生物武器对体会产生严重的伤害。

作为现代光学分析技术的一个重要组成部分,激光诱导荧光遥感探测技术将激光雷达技术与激光诱导荧光技术很好地结合起来^[6],可以对大气中的生物气溶胶进行有效探测,也可以测量海藻的生长情况^[7]以及叶绿素的荧光寿命^[8]等。在激光诱导下生物气溶胶会产生荧光效应,而多数非生物气溶胶则不能,因此可以对生物气溶胶与非生物气溶胶进行区分^[9]。在远距离探测生物气溶胶方面,激光诱导荧光雷达能够对生物气溶胶进行高效、准确以及实时的探测,已成为一种高效的测量手段,对荧光雷达探测系统的研究越来越受到人们的重视^[10-12]。然而,探测大气中的生物气溶胶颗粒的含量和分布,是一项挑战性的工作^[13-14]。20世纪90年代,美国爱德华研究与工程中心研制了一台用于生物气溶胶的遥感探测及模拟探测的紫外-荧光雷达系统,并测量了600~3000 m的生物气溶胶荧光光谱;此外,美国陆军化学和生物防御指挥部也成功研制了一种探测距离可达30 km的生物传感探测系统^[15-16]。在国内目前尚未见到激光诱导大气生物气溶胶荧光雷达系统产品的报道,多为理论分析和系统设计的研究^[17-18]。

本文在阐述生物气溶胶探测原理的基础上,设计了一台激光诱导荧光雷达,并对系统的有效探测距离以及系统的灵敏度进行数值仿真。系统发射的紫外激光脉冲与大气生物气溶胶发生荧光效应,由探测器接收荧光转化为电流信号,将预期的信噪比公式化,作为一个范围函数进行讨论。在信噪比的数值仿真中,主要考虑了荧光的能量功率、光电探测器转换效率、探测器噪声电流以及背景噪声等参数以及周围环境的影响,模拟了不同条件下激光诱导荧光雷达系统的探测性能,得到系统信噪比随探测距离的变化曲线以及在一定距离上,信噪比随生物气溶胶粒子浓度变化曲线。

2 生物气溶胶探测原理

激光器发射激光脉冲与大气中的分子以及气溶胶粒子发生作用,产生的回波信号,由望远镜接收,再对接收到的回波信号进行信号提取,即可获得大气中各参量信息。生物气溶胶的探测是根据大气中有机气溶胶颗粒在激光的激发下产生荧光的原理来实现的,当生物气溶胶与激光发生作用,受到光子激发,便会发出荧光^[19]。与弹性散射(Mie散射、瑞利散射)激光雷达相比,激光诱导荧光雷达系统的探测距离比较有限,前者的探测距离能够达到数10 km^[20]。这是因为荧光的散射截面相对于弹性散射截面要低3~5个数量级,荧光信号较弱^[21-22]。此外,受到荧光量子效率和荧光淬灭^[23]的影响,荧光能量也会减弱;同时,通常荧光信号与天空背景光更近^[24],使更多的背景噪声进入探测器中。

荧光回波信号的能量强度的理论值 $P(R)$ 可以通过经典荧光雷达方程^[25]得到,假设探测的生物气溶胶云层是均匀的,则荧光雷达方程为

$$P(R) = \frac{1}{2} E_0 c \frac{A_0}{R^2} \exp\{-[\gamma(\lambda_1) + \gamma(\lambda_2)]R\} \xi(R) S \Delta\lambda N(R) \eta_0, \quad (1)$$

式中 E_0 为激光输出脉冲能量[J], c 为光速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, A_0 为望远镜接收面积 $[\text{m}^2]$, R 为探测距离[km], γ 为大气消光系数 $[\text{km}^{-1}]$, λ_1 为激发波长, λ_2 为荧光波长, $\xi(R)$ 为几何重叠因子, S 为荧光非弹性散射的有效截面积 $[\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}]$, $\Delta\lambda$ 为滤光片带宽, $N(R)$ 为生物气溶胶粒子质量分数, η_0 为光学系统对荧光波长的接收效率。

3 激光诱导荧光雷达

本文所设计的激光诱导荧光雷达系统示意图如图1所示。重复频率为10 Hz的二极管抽运固态Nd:YAG激光器作为激光诱导生物气溶胶的激发光源,发射激光脉冲波长为355 nm;系统使用直径为30 cm的Cassegrain望远镜接收回波信号。接收到的回波信号主要由弹性散射信号和生物气溶胶粒子产生的荧光信号组成。考虑到散射信号和荧光信号的波长存在较大范围的差别,采用分光棱镜对回波信号进行分光,对波长相对较短的弹性散射信号进行全反射,而对长波的荧光信号实现全透通过,即可得到不同波长的两组信号。弹性散射信号经过偏振片后由光电倍增管PMT2、PMT3分别探测,而荧光回波信号则经过滤光片滤波后进入光电倍增管PMT1,再由数据采集卡(DAQ)采集后送入计算机处理。表1为激光诱导荧光雷达系统主要参数。

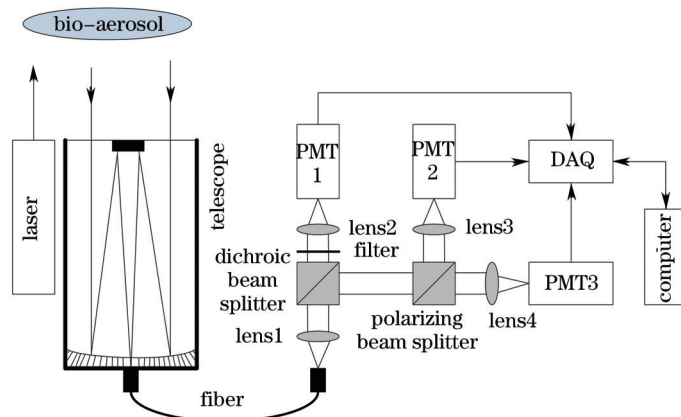


图1 激光诱导荧光雷达示意图

Fig.1 Configuration of the laser induced fluorescence lidar

表1 激光诱导荧光雷达系统主要参数

Table 1 Specifications of the laser induced fluorescence lidar

Definition	Reference value	Definition	Reference value
Laser wavelength /nm	355	Field of view of telescope /mrad	0.5
Pulse energy /mJ	100/60/30	Filter bandwidth /nm	20/40/60
Pulse repetition frequency /Hz	10	Fluorescence wavelength /nm	450
Beam diameter /mm	0.9	Detector frequency bandwidth /MHz	5
Beam divergence /mrad	0.5	Transmission of receiving optical train	0.3
Diameter of telescope /cm	30	Quantum efficiency of the PMTs	0.2

4 仿真结果与分析

在白天天气情况下,根据系统与太阳相应的方位设定背景光参数 S_λ ,天空背景辐射在 PMT 的光阴极产生光电子流 i_b ,则

$$i_b = S_\lambda \Omega_0 A_0 \Delta\lambda \eta_{\text{PMT}} e \frac{\lambda}{hc} \quad (2)$$

式中 Ω_0 为望远镜接收视场角 [sr], η_{PMT} 为 PMT 的探测效率, e 为电子电荷 [Q], h 为普朗克常数 [J·s], c 为光速 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. 在光电阴极产生的信噪比与荧光信号、天空背景噪声以及探测器暗电流噪声的关系可表示为

$$Y_{\text{-SNR}}(R) = \frac{i_s}{i_n} = \frac{i_s}{\sqrt{2Be(i_s + i_b + i_d)}} \quad (3)$$

式中 i_n 为光电阴极产生的噪声,包括荧光信号电流 i_s 、背景噪声电流 i_b 、探测器噪声电流 i_d , B 为探测器的频率带宽 [Hz], 荧光信号进入 PMT 探测器,在光电阴极产生电流 i_s 可表示为

$$i_s = P(R) \eta_{\text{PMT}} e \frac{\lambda_2}{hc} \quad (4)$$

远距离探测荧光激光雷达主要依靠高能量的紫外激光,应用同步累加技术来提高探测器的信噪比^[26],大量回波信号进行累加与平均处理,得到最终的信噪比为

$$Y_{\text{-SNR}}(R) = \frac{P(R) \eta_{\text{PMT}} e \frac{\lambda_2}{hc} \sqrt{n}}{\sqrt{2eB \left[P(R) \eta_{\text{PMT}} e \frac{\lambda_2}{hc} + S_\lambda \Omega_0 A_0 \Delta\lambda \eta_{\text{PMT}} e \frac{\lambda}{hc} + i_d \right]}} \quad (5)$$

式中 n 为总的激光脉冲数量,设定激光器工作时间为 10 s,激光器脉冲重复频率为 10 Hz,则脉冲数量为 100.

在系统仿真过程中,设定被测生物气溶胶粒子的质量分数为 10^{-12} ,生物气溶胶粒子荧光非弹性散射截面积 S 为 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1[27]}$;选定信噪比最小参量为 10(探测信号的误差小于 10%)进行光谱信号的分析.表2为部分实验环境参数.

表 2 实验环境参数

Table 2 Experimental environment parameters

Definition	Reference value
Fluorescence cross-section of bio-aerosols / ($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)	$10^{-13} \sim 10^{-12}$
Daytime background noise / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)	10^3
Nighttime background noise / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)	10^{-5}
Photocathode dark current / A	10^{-15}

在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 时, 给定不同激光脉冲能量的情况下, 系统探测生物气溶胶信噪比对应的有效探测距离曲线如图 2 所示。在夜间, 激光脉冲能量为 30、60、100 mJ, 荧光散射截面 S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时, 系统的有效探测距离分别为 150、200、250 m, S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时, 系统有效探测距离为 500、700、900 m; 在白天条件下, 系统的有效探测距离在 50~120 m 之间。仿真结果表明不同的激光脉冲能量, 不同的生物气溶胶粒子荧光的散射截面, 会很大程度影响雷达系统的有效探测距离。白天, 系统的最大有效探测距离仅为 120 m (信噪比为 10), 这说明强太阳背景辐射会严重影响系统的探测性能。

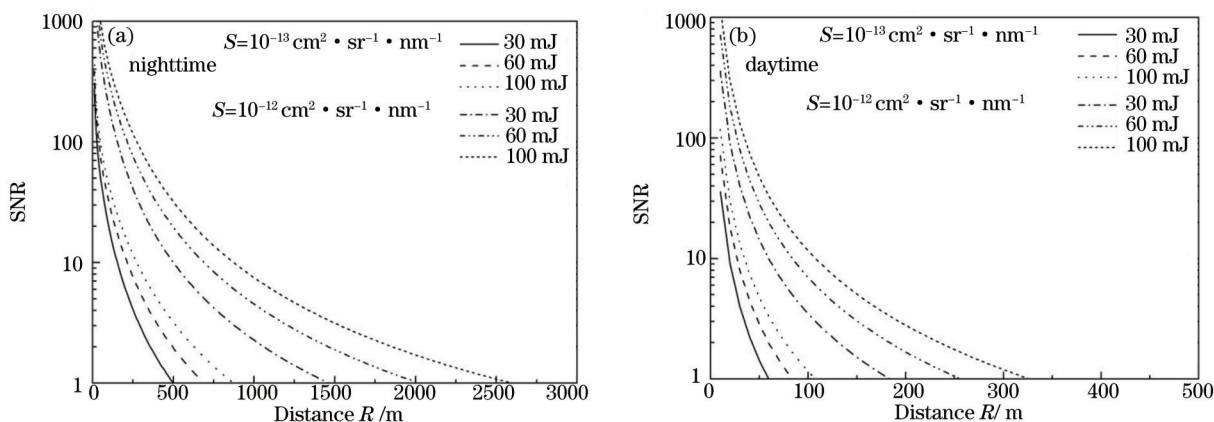


图 2 激光脉冲能量分别为 100、60、30 mJ 时的系统信噪比

Fig.2 SNRs with the different pulse energies of 100,60, 30 mJ, respectively

在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 时, 对于给定的不同带宽的滤光片, 生物气溶胶激光雷达系统的有效探测距离曲线也有很大区别, 如图 3 所示。在夜间条件下, 滤光片带宽分别为 20、40、60 nm, S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时, 得到系统的有效探测距离分别为 200、250、280 m, 而在 S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 条件下, 系统的有效探测距离分别为 500、700、800 m, 增加滤光片带宽有助于提高系统的有效探测距离; 然而白天时, 系统的有效探测距离为 180 m, 说明受较强太阳背景辐射的影响, 仅增加滤波片带宽, 对系统性能的提高作用不大。

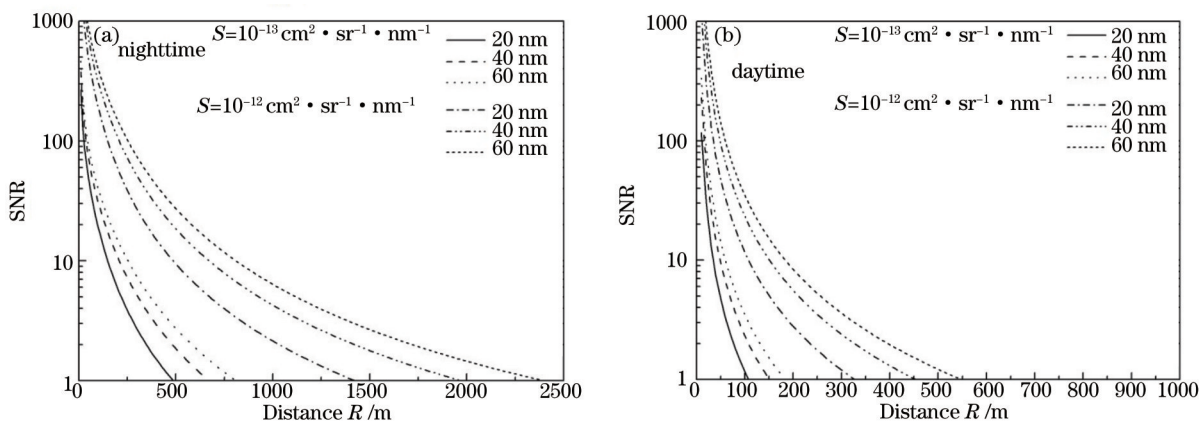


图 3 滤光片带宽分别为 20、40、60 nm 时的系统信噪比

Fig.3 SNRs with the width of filters of 20,40, 60 nm, respectively

图4所示为在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 时,不同激光脉冲数量对系统的有效探测距离的影响。夜间,在激光脉冲数分别为100、600和6000,荧光散射截面 S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,系统的有效探测距离分别为190、250、400 m, S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 条件下,系统的有效探测距离分别为500、750、1200 m,结果表明增加激光脉冲数量可以有效地提高系统的有效探测距离;白天时,随着激光发射脉冲数量的增加,系统的有效探测距离最大可达300 m。这充分说明大量脉冲数量的累加能够在一定程度上提高系统的信噪比,但在实际的操作中,激光脉冲数量的增加毕竟有限,且会降低系统的时间分辨率,因此不能仅靠增加激光脉冲数量来提高系统的探测距离。

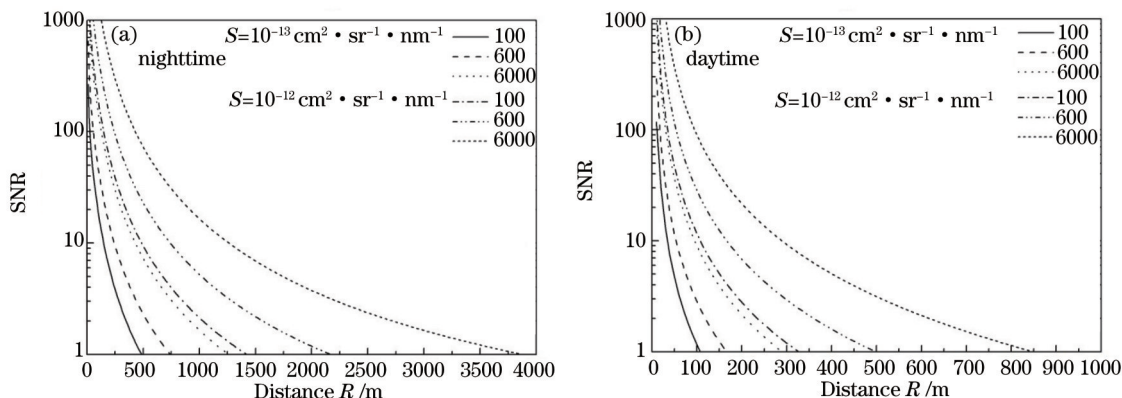


图4 脉冲数量分别为100、600和6000时的系统信噪比

Fig.4 SNRs with the pulse counts of 100,600 and 6000,respectively

在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 时,给定不同望远镜口径的情况下,系统探测生物气溶胶信噪比对应的有效探测距离曲线如图5所示。在夜间,望远镜口径为20、25、30 cm,荧光散射截面积 S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,系统的有效探测距离分别为180、220、250, S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,系统有效探测距离为400、700、850 m;在白天条件下,系统的有效探测距离在40~100 m之间。仿真表明增加望远镜口径有助于提高系统的有效探测距离;白天,系统的最大有效探测距离仅为100 m,这说明强太阳背景辐射对系统的探测性能产生严重的影响。

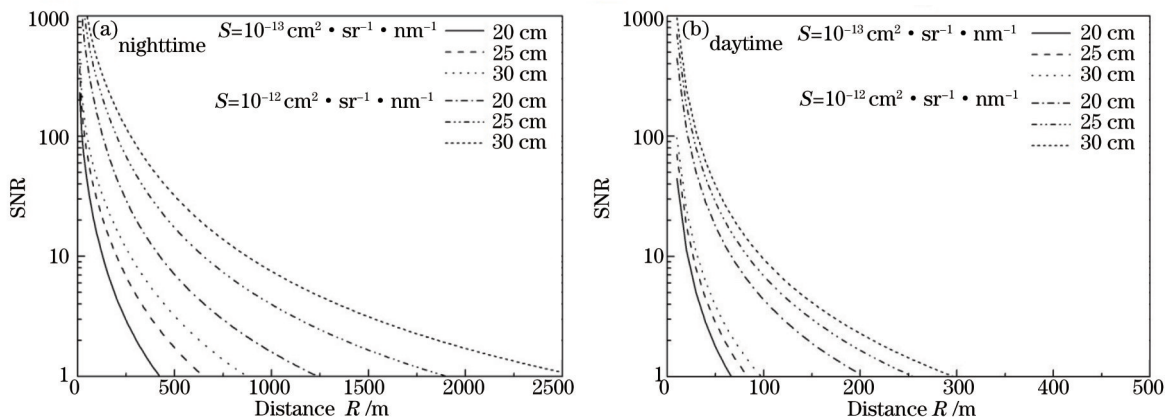


图5 望远镜口径分别为20、25、30 cm时的系统信噪比

Fig.5 SNRs with the telescope diameters of 20,25, 30 cm,respectively

在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 时,对于给定的不同望远镜的接收视场角,如图6所示。在夜间条件下,接收视场角分别为0.3、0.4、0.5 mrad, S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,得到系统的有效探测距离皆为260 m,而在 S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 条件下,系统的有效探测距离同为800 m,这说明夜间情况下,系统的有效探测距离并不受视场角的影响;而在白天,系统的有效探测距离仅为120 m,且随着接收视场角的增大,系统有效探测距离随之减小,这说明加大望远镜接收视场角会增大系统受太阳背景辐射的影响。

以上仿真结果表明,同时增加激光脉冲能量、滤光片带宽及激光脉冲数可有效提高系统的探测距离。在生物气溶胶粒子质量分数为 10^{-12} 的情况下,夜间探测时,可选用带宽为60 nm的滤光片,在脉冲能量为100 mJ,脉

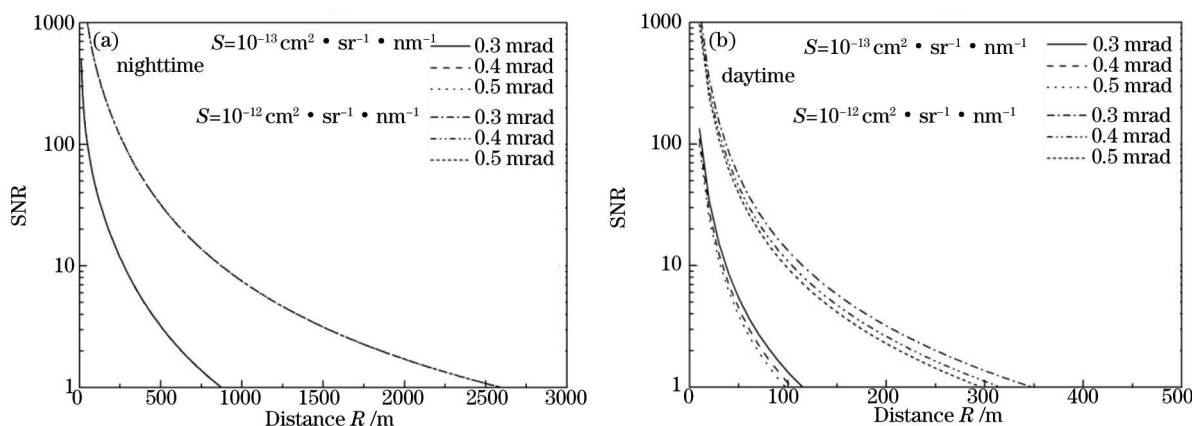


图 6 视场角分别为 0.3、0.4、0.5 mrad 时的系统信噪比

Fig.6 SNRs with the fields of view of 0.3, 0.4, 0.5 mrad, respectively

冲数量为 6000, 望远镜口径为 30 cm 的情况下, 有效探测距离可达 7.8 km, 而在白天, 同等参数下, 有效探测距离约为 1.0 km, 如图 7 所示。过大的滤光片带宽造成强太阳背景噪声进入探测系统, 使得系统信噪比随距离急剧下降。

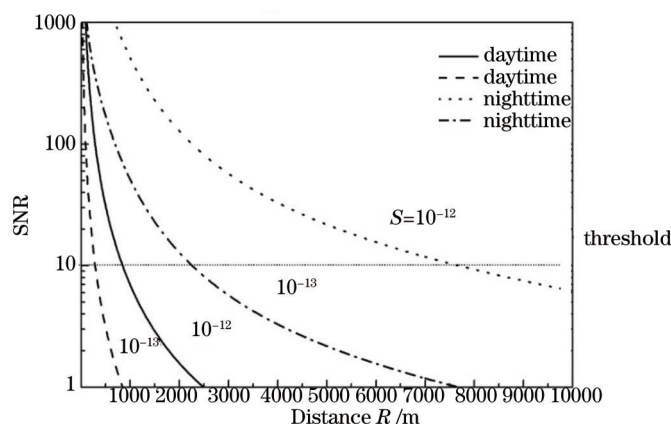


图 7 脉冲能量为 100 mJ, 滤光片带宽为 60 nm, 脉冲数量为 6000 时的系统信噪比曲线

Fig.7 SNR curves with a pulse energy of 100 mJ, a filter width of 60 nm and a pulse counts of 6000

为检验系统的探测灵敏度, 假定生物气溶胶距离激光雷达系统位置固定为 0.5 km, 在激光脉冲能量为 100 mJ, 滤光片带宽为 60 nm, 脉冲数为 6000, 望远镜口径为 30 cm 的条件下, 仿真得到了系统信噪比随生物气溶胶粒子质量分数变化的情况, 如图 8 所示。白天探测时, 若生物气溶胶粒子荧光非弹性散射截面积 S 为 $10^{-13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 在探测误差小于 10% (系统信噪比大于 10) 的情况下, 雷达系统能够探测的生物气溶胶粒子最小质量分数约为 3.5×10^{-13} , 若 S 为 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 则系统的探测灵敏度为 1.8×10^{-13} , 且系统的信噪比随着粒子浓度的增加而

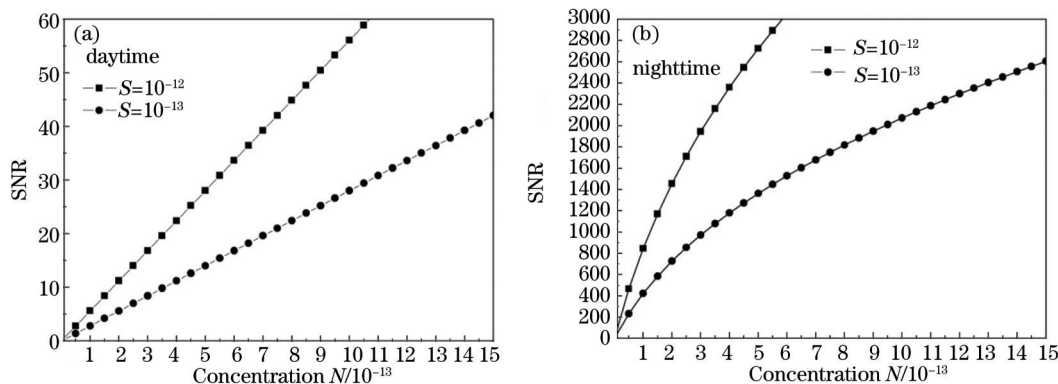


图 8 信噪比与生物气溶胶浓度关系

Fig.8 Relationship between SNR and bio-aerosols concentration

变大。夜间探测时,系统的探测灵敏度可达 1.0×10^{-14} ,在生物气溶胶粒子荧光散射截面积 S 分别为 10^{-13} 、 $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,可分别获得系统信噪比为 50 和 90;随着粒子浓度的增加,信噪比也快速增大,且增速与散射截面的大小成正比例关系。很显然,系统在夜间具有更好的探测性能,能够探测更低浓度的生物气溶胶粒子并能达到较高的信噪比,并且在同一浓度时,生物气溶胶粒子荧光散射截面积 S 越大,信噪比越高。

5 结 论

设计了一台激光诱导荧光雷达系统,用于探测大气中的生物气溶胶粒子。为了解激光诱导荧光雷达系统对生物气溶胶粒子的有效探测距离及随生物气溶胶浓度变化的敏感性,对系统进行数值仿真。仿真结果表明,系统在白天和夜间对生物气溶胶粒子的有效探测距离分别可达 1.0、7.8 km;对生物气溶胶质量分数的最小分辨能力为 1.8×10^{-13} 和 1.0×10^{-14} 。在仿真的过程中,增加激光脉冲能量、激光脉冲数、滤光片带宽和望远镜口径,能够增加系统对生物气溶胶粒子的有效探测距离;且系统在夜间能够探测更低浓度的生物气溶胶粒子。白天存在的太阳背景辐射对系统的信噪比影响较大,会导致系统探测性能的下降。因此,如需要探测较远距离,分辨较低浓度的生物气溶胶粒子,在夜间探测的实验效果会更好。此外,在相同参数条件下,生物气溶胶粒子的荧光非弹性散射截面积对系统的探测性能也具有较大影响,荧光散射截面积大的生物气溶胶粒子更容易被系统探测。

参 考 文 献

- 1 Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua, et al.. Research on preprocessing algorithm for infrared spectral signals of biological aerosols [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2742–2747.
兰天鸽,熊伟,方勇华,等.生物气溶胶红外光谱信号预处理算法研究[J].光学学报,2010,30(9):2742–2747.
- 2 Xu Ao, Xiong Chao, Zhang Pei, et al.. Research on dual-channel detection technology of bio-aerosols with intrinsic fluorescence measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812005.
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.
- 3 Zhang Pei, Zhao Yongkai, Yang Wei, et al.. Development of a virtual impactor for submicron particles[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116002.
张佩,赵永凯,杨巍,等.亚微米粒子虚拟冲击器的研制[J].中国激光,2014,41(1):0116002.
- 4 Després V R, Alex Huffman J, Burrows S M, et al.. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review[J]. Tellus B, 2012, 64(1): 145–153.
- 5 Feng Chunxia, Hung Lihua, Wang Jianbo, et al.. Theoretical studies on bioaerosol particle size and shape measurement from spatial scattering profiles[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 092901.
- 6 Pan Y L, Hill S C, Pinnick R G, et al.. Fluorescence spectra of atmospheric aerosol particles measured using one or two excitation wavelengths: Comparison of classification schemes employing different emission and scattering results[J]. Opt Express, 2010, 18(12): 12436–12457.
- 7 He Yan, Wu Dong. Performance evaluation of airborne ocean lidar for measuring chlorophyll-a, suspended matter and coastal water depth in the east china sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(4): 649–654.
贺岩,吴东.机载海洋激光雷达测量叶绿素a浓度、悬移质浓度和浅海深度的性能估计[J].中国海洋大学学报,2004,34(4):649–654.
- 8 Wan Wenbo, Hua Dengxin, Le Jing, et al.. Laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime measurement and characteristic analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 190601.
万文博,华灯鑫,乐静,等.激光诱导叶绿素荧光寿命的测量及其特征分析[J].物理学报,2013,62(19):190601.
- 9 Eversole J D, Scotto C S, Spence M, et al.. Continuous bioaerosol monitoring using UV excitation fluorescence[C]. SPIE, 2003, 4829: 532–533.
- 10 Pan Y L, Huang H, Chang R K. Clustered and intergrated fluorescence spectra from single atmospheric aerosol particles excited by a 263- and 351-nm laser at New Haven, CT, and Adelphi, MD[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2012, 113(17): 2213–2221.
- 11 Kaliszewski M, Trafny E A, Lewandowski R, et al.. A new approach to UVAPS data analysis towards detection of biological aerosol[J].

- Journal of Aerosol Science, 2013, 58(4): 148–157.
- 12 Fumikazu Taketani, Yugo Kanaya, Takayuki Nakamura, *et al.*. Measurement of fluorescence spectra from atmospheric single submicron particle using laser-induced fluorescence technique[J]. Journal of aerosol Science, 2013, 58: 1–8.
- 13 Hill S C, Pinnick R G, Niles S, *et al.*. Real-time measurement of fluorescence spectra from signal airborne biological particles[J]. Field Analytical Chemistry and Technology, 1999, 3(4–5): 221–239.
- 14 Davitt K, Song Y K, Patterson W R, *et al.*. 290 and 340 nm UVLED arrays for fluorescence detection from single airborne particles[J]. Opt Express, 2005, 13(10): 3583–3593.
- 15 Mcndonsa R A. Lidar protects against biological warfare agents[J]. Photonics Spectra, 1997, 31(2): 20–25.
- 16 Butler J C, Christesen S D, DeSha M S, *et al.*. UV fluorescence lidar detection of bioaerosols[C]. SPIE, 1994, 2222: 228–237.
- 17 Cai Shuyao, Zhang Pei, Zhu Linglin, *et al.*. Research on detection technology of bio-aerosols with tryptophan intrinsic fluorescence measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512009.
蔡舒窈, 张 佩, 朱玲琳, 等. 基于色氨酸本征荧光测量的生物气溶胶检测技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512009.
- 18 Feng Chunxia, Huang Lihua, Zhou Cuangchao, *et al.*. Computation and analysis of light scattering by monodisperse biological aerosols [J]. Chines J Lasers, 2010, 37(10): 2592–2598.
冯春霞, 黄立华, 周光超, 等. 单分散生物气溶胶光散射特性的计算与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2592–2598.
- 19 Zou Bingfang, Zhang Yinchao, Hu Shunxing. Study on the design of measuring organic aerosol fluorescence lidar[J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 287–289.
邹炳芳, 张寅超, 胡顺星. 探测有机气溶胶荧光激光雷达的设计研究[J]. 激光技术, 2008, 32(3): 287–289.
- 20 Yin Junyan, Yin Fuchang, Chen Ming, *et al.*. Impact on laser transmission in atmosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (suppl): 399–402.
阴俊燕, 尹福昌, 陈 明, 等. 影响激光大气传输因素分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(suppl): 399–402.
- 21 Sivaprakasam V, Huston A L, Scotto C, *et al.*. Multiple UV wavelength excitation and fluorescence of bioaerosols[J]. Opt Express 2004, 12(19): 4457–4466.
- 22 Faris G, Copeland R A, Mortelmans K, *et al.*. Spectrally resolved absolute fluorescence cross sections for bacillus spores[J]. Appl Opt, 1997, 36(4): 958–967.
- 23 Bhattar S L, Kolekar G B, Patil S R. Spectroscopic studies on the molecular interaction between salicylic acid and riboflavin (B2) in micellar solution[J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(3): 355–359.
- 24 Dai Yang, Cui Xuesen, Wu Yumei, *et al.*. Theoretical computation and experimental measurement on properties of scattering irradiance in daytime[J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 39–41.
戴 阳, 催雪森, 伍玉梅, 等. 白天天空背景光变化特性的理论研究计算与实验测量[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 39–41.
- 25 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: 446–456.
- 26 Zhou Qianting, Wei Jun, Xu Zhipeng. Influence of noise feature on multiple sampling, accumulation and averaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 959–962.
周倩婷, 危 峻, 徐志鹏. 噪声特性对多次采样累加平均技术的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 959–962.
- 27 Pan Y, Hill S C, Santarpia J L. Spectrally-resolved fluorescence cross sections of aerosolized biological live agents and stimulants using five excitation wavelengths in a BSL-3 laborator[J]. Opt Express, 2014, 22(7): 8165–8189.

栏目编辑: 史 敏