

doi:10.3788/gzxb20174612.1201002

# 不同紫外波段激发生物气溶胶荧光雷达系统性能分析

王强,何廷尧,华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

**摘 要:**基于激光诱导生物荧光技术,分别采用紫外 355 nm 和 266 nm 激光作为激发光源,构建生物气溶胶荧光雷达监测系统模型.综合考虑不同激发波段,臭氧吸收以及太阳背景光等因素对激光雷达荧光探测效果的影响,对系统性能进行数值仿真分析.仿真结果表明,在四倍频 266 nm 紫外波段的激光激发下,系统受地表臭氧的影响,白天的有效探测距离非常有限;在系统信噪比为 10(SNR=10),臭氧浓度为 50  $\mu\text{g}/\text{L}$  时,最大探测距离仅为 300 m;而夜间情况下,太阳背景光影响减弱,探测距离约为 450 m.三倍频 355 nm 激发时,臭氧对系统的探测性能影响较小,夜间探测距离可达 750 m;白天太阳背景光对 355 nm 的系统影响较大,在相同 0.5 mrad 接收视场角下,其有效探测距离约为 330 m.为减少白天背景光的影响,将望远镜接收视场角压缩到 0.3 mrad,同时选用 50 nm 带宽的滤光片,此时系统的探测距离为 480 m.由于 355 nm 波段的激发荧光受白天太阳背景光的影响较大,在进行夜间探测时才可获得较好的效果;而 266 nm 的激发波段可以很好的抑制背景光影响,能够实现对生物气溶胶的白天有效探测.

**关键词:** 荧光雷达;信噪比;激光诱导荧光;生物气溶胶;臭氧;太阳背景光;数值仿真

中图分类号:TH765.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1201002-8

## Performance Analysis of Fluorescence Lidar with Different Excited Wavelengths

WANG Qiang, HE Ting-yao, HUA Deng-xin

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

**Abstract:** Based on laser induced bioluminescence technique, ultraviolet 355 nm and 266 nm laser were used as excitation light source respectively to construct a model of biological aerosol fluorescence radar monitoring system. The effects of different excitation bands, ozone absorption and solar background light on lidar fluorescence detection are comprehensively considered. The system performance is numerically simulated and analyzed. The simulation results show that the system with the laser excitation of 266 nm band, is strongly affected by the surface ozone, so the effective detection range at daytime is very limited. When the system signal-to-noise ratio is 10 (SNR = 10), ozone concentration 50 ppb, the maximum detection range is about 300 m. While at the night time conditions, the detection range is about 450 m. For the excitation of 355 nm, ozone has little effects on the detection performance of the system, its detectable range up to 750 m at night. Solar background light effects on 355nm quite large at the field of view 0.5 mrad, where the effective detection range is about 330 m. In order to reduce the influence of daytime background light, the field of view of the telescope was compressed to 0.3 mrad, and the filter with 50 nm bandwidth was used. The detection range can be up to 480 m at this case. In the conclusions, the excitation of 355 nm band should better be used in night time measurement, while excitation band of 266 nm can well inhibit the effects of solar background light, so as to realize the effective detection of biological aerosols during the day.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41405028,61675167)资助

第一作者:王强(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达遥感探测技术.Email:710952018@qq.com

导师(通讯作者):何廷尧(1984—),男,副教授,硕导,主要研究方向为激光雷达大气遥感、光电检测技术.Email:tingyao.he@xaut.edu.cn

收稿日期:2017-06-01;录用日期:2017-08-16

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Fluorescence lidar; Signal-to-noise ratio; Laser induced fluorescence; Biological aerosol; Ozone; Solar background light; Numerical simulation

**OCIS Codes:** 010.3640; 260.2510; 160.6060; 290.1090

## 0 引言

稳定悬浮在空气中的固相或液相粒子(0.01~100  $\mu\text{m}$  之间)组成的分散相被称为气溶胶<sup>[1]</sup>.大部分气溶胶颗粒属于可吸入颗粒物( $< 10 \mu\text{m}$ ),可以通过肺泡进入人体并极易引发各种疾病<sup>[2]</sup>.具有生物活性的气溶胶被称为生物气溶胶.生物气溶胶种类可以细分为:细菌、真菌、病毒、毒素、衣原体、立克次体和原虫等<sup>[3-4]</sup>.虽然生物气溶胶粒子在大气气溶胶中所占比例极小,但它对人类健康和动植物的生长会造成很大危害<sup>[5]</sup>.微生物是导致感染和传染病的根源,大气是其传播的重要途径,如人类的肺结核病和流行性感、家畜的一些疾病(孢子菌病)以及农作物的黑秆锈病等都是通过空气传播的<sup>[6]</sup>.

生物气溶胶的点监测器能够对周围空气中的生物粒子进行实时监测,具有良好的稳定性,能够长时间不间断工作.高精度的探测器有美国 TSI 粒子计数器,布鲁克(Bruker)通用生物检测器<sup>[7-8]</sup>等.由于检测去除了背景噪声,点监测系统检测灵敏度更高.但是这类仪器会受到气泵功率的限制,其检测通量较小,覆盖距离短,并且部署成本较高.目前,世界各国十分重视实时大气生物气溶胶探测技术与仪器的研究.现代生物气溶胶检测方法越来越多地引入了光学手段<sup>[9]</sup>.早在 19 世纪 90 年代初,美国陆军爱德华研究与发展工程中心就曾研制出一台紫外荧光雷达系统<sup>[10]</sup>,可用于生物气溶胶的遥感探测及模拟探测.该雷达采用了一台小型光谱仪和一台门控的 ICCD 相机,并用它测量了距离为 600 m、2 000 m 以及 3 000 m 处的生物气溶胶荧光光谱;此外,在 2004 年,英国国防科学技术实验室(Defence Science and Technology Laboratory, DSTL)设计制造出一款小型荧光雷达<sup>[11]</sup>.在国内,荧光雷达系统的研究大部分仍停留在数值模拟仿真阶段,目前尚未见到激光诱导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.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<sup>[12]</sup>,可以对大气中的生物气溶胶进行有效探测.

本文构建了用于生物气溶胶探测的荧光激光雷达模型,分别采用 266 nm 和 355 nm 两种紫外波段激发大气生物气溶胶,产生荧光效应,对返回的荧光信号强度进行数值模拟分析,在综合考虑地表臭氧浓度以及太阳背景光等影响因素的情况下,检验不同激发波长、不同系统参数对探测能力的量化影响,从而选择最佳的雷达系统模型,为设备的研制做理论支撑.

## 1 荧光激光雷达

激光诱导荧光<sup>[13-14]</sup>,即当介质受到激光照射后,使原本处于平衡状态的电子吸收特定波长的光子能量,跃迁到激发态的不同振动能级上.而跃迁后,能量较大的激发态电子在  $10^{-15}$  s 的时间内,因分子间的碰撞或晶格间的相互作用会损失一部分能量,从较高振动能级下降到低振动能级,处于第一激发态最低振动能级上的电子极不稳定,在短时间( $10^{-9} \sim 10^{-6}$  s)内发射一个光子从而返回到基态,这时所发射的光称为荧光<sup>[15]</sup>.因为荧光是由激发态最低能级的分子跃迁回基态所释放的能量,而在振动弛豫过程中会损失一部分能量,所以荧光的能量小于吸收光的能量,故荧光波长总会比激发光波长要长一些<sup>[16]</sup>.

荧光回波信号的能量强度的理论值  $P(z)$  可以通过经典荧光雷达方程得到,假设探测的生物气溶胶云层是均匀的,则荧光雷达方程<sup>[17]</sup>为

$$P(z) = \frac{1}{2} E_0 c \frac{A_0}{z^2} T(z) \xi(z) S \Delta \lambda N(z) \eta_0 \quad (1)$$

式中,  $E_0$  为激光输出脉冲能量,单位为 J,  $c$  为光速,单位为  $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ ,  $A_0$  为望远镜接收面积,单位为  $\text{m}^2$ ,  $z$  为探测距离,单位为 Km,  $T(z)$  为大气透过率,  $\xi(z)$  为几何重叠因子,  $S$  为荧光非弹性散射的有效截面积,单位为  $\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ,  $\Delta \lambda$  为滤光片带宽,  $N(z)$  为生物气溶胶粒子浓度,  $\eta_0$  为光学系统对荧光波长的接收效率.

本文构建的荧光激光雷达系统模型分别采用 266nm 和 355nm 的激发波段,其结构图见图 1.二极管泵浦固态 Nd:YAG 激光器经四倍频或者是三倍频分频以后分别发出 266 nm 和 355 nm 波段的激光,与大气分子和生物气溶胶粒子发生作用,产生的回波信号由 Cassegrain 望远镜进行接收,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,本文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,即可得到不同波段的两组信号.266 nm(355 nm)的弹性散射信号经过滤光片滤波后进入光电倍增管 PMT<sub>1</sub>(PMT<sub>3</sub>),而荧光信号由 PMT<sub>2</sub>(PMT<sub>4</sub>)进行探测,接着经示波器进行数据采集以及计算机的数据处理工作,就可获得大气中生物气溶胶的参量信息.

## 2 系统性能仿真分析

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为

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

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,单位为 Hz,荧光信号进入 PMT 探测器,在光电阴极产生的电流  $i_s$  为

$$i_s = P(R)\eta_{pmt}e(\lambda_2/hc) \quad (3)$$

式中,  $\eta_{pmt}$  为 PMT 的探测效率,  $e$  为电子电荷,单位为 C,  $h$  为普朗克常数,单位为  $j \cdot s$ ,  $c$  为光速,单位为  $m \cdot s^{-1}$ ,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<sup>[18]</sup>.

白天,根据系统与太阳相应的方位设定背景光参数为  $S_b$ ,天空背景辐射在 PMT 的光电阴极产生光电子流  $i_b$ ,则

$$i_b = S_b\Omega_0A_0\Delta\lambda\eta_{pmt}e(\lambda/hc) \quad (4)$$

式中,  $\Omega_0$  为望远镜接收视场角,单位为 sr,  $\Delta\lambda$  为滤波片带,单位为 nm,大量回波信号进行累加与平均处理,得到最终的信噪比为

$$Y_{-SNR}(R) = \frac{P(R)\eta_{pmt}e\frac{\lambda_2}{hc}\sqrt{n}}{\sqrt{2eB\left[P(R)\eta_{pmt}e\frac{\lambda}{hc} + S_b\Omega_0A_0\Delta\lambda\eta_{pmt}e\frac{\lambda}{hc} + i_d\right]}} \quad (5)$$

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.表 1 为激光诱导荧光雷达系统的主要参数.

表 1 荧光激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	266/355	Field of view of telescope/mrad	0.3/0.5
Pulse energy/mJ	100	Filter bandwidth/nm	30/50
Pulse repetition frequency/Hz	10	Fluorescence wavelength/nm	295/450
Beam diameter/mm	0.9	Detector frequency bandwidth/MHz	5
Beam divergence/mrad	<0.3	Transmission of receiving optical train	0.3
Diameter of telescope/cm	30	Quantum efficiency of the PMTs	0.2

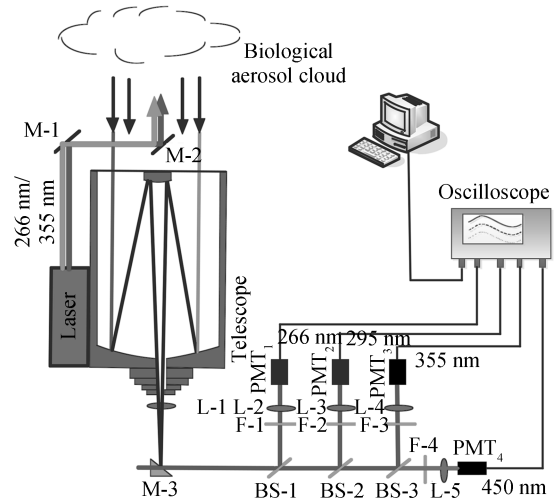


图 1 荧光雷达系统结构

Fig.1 Diagram of the fluorescence lidar

表 2 实验环境参数

Table 2 Experimental environment parameters

Definition	Reference value
Biological aerosol	
Fluorescence cross-section/( $\text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ )	$10^{-12}$
Background noise	
Solar background light/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ )	$10^{-5} \sim 10^3$
Photocathode dark current/A	$10^{-15}$

### 2.1 臭氧浓度对系统探测性能的影响

在不同臭氧浓度的情况下,不同紫外波段激发生物气溶胶荧光雷达系统信噪比对应的有效探测距离如图 2.假定激发波段在 266 nm 及 355 nm 时白天和夜晚的太阳背景光分别为  $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  和  $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ,望远镜视场角为 0.5 mrad,滤光片带宽为 30 nm.在夜间,臭氧浓度为 10  $\mu\text{g/L}$ 、30  $\mu\text{g/L}$ 、50  $\mu\text{g/L}$  (SNR=10)时,266 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 670 m、560 m、450 m;355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 870 m、860 m、750 m.在白天,臭氧浓度为 10  $\mu\text{g/L}$ 、30  $\mu\text{g/L}$ 、50  $\mu\text{g/L}$  (SNR=10)时,266 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 420 m、370 m、300 m;355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 610 m、610 m、550 m.其不同臭氧浓度下系统的有效探测距离见表 3.结果表明,臭氧浓度大小和激光激发波段的大小会很大程度影响系统的探测效果.对于 266 nm 的激发波段臭氧浓度大小的变化影响效果尤为显著,要使得系统的探测效果变好需要降低臭氧浓度的影响;臭氧的浓度的变化对于 355 nm 的激发波段的影响不大,在夜晚信噪比为 10 时最大有效探测距离不低于 750 m,在白天最大有效探测距离可达 550 m.

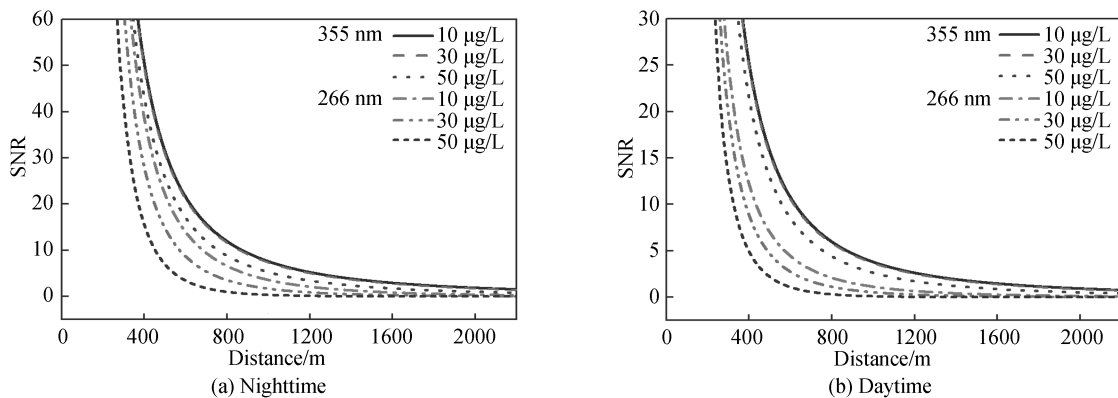
图 2 臭氧浓度分别为 10、30、50  $\mu\text{g/L}$  时系统信噪比Fig.2 SNRs with the ozone concentration of 10, 30, 50  $\mu\text{g/L}$ 

表 3 不同臭氧浓度下系统的有效探测距离 (SNR=10)

Table 3 Effective detection range of the system with different ozone concentrations (SNR=10)

External condition		10 $\mu\text{g/L}$	30 $\mu\text{g/L}$	50 $\mu\text{g/L}$
Nighttime	266 nm	670 m	560 m	450 m
	355 nm	870 m	860 m	750 m
Daytime	266 nm	420 m	370 m	300 m
	355 nm	610 m	610 m	550 m

### 2.2 太阳背景光对系统探测性能的影响

理论上,在同样激光出射功率条件下,短波的大气分子散射较长波强烈,其有效穿透距离应该更短.仿真中,通过改变望远镜视场角,假定滤光片带宽为 30 nm,计算得到不同太阳背景光下不同紫外波段激发生物气溶胶荧光雷达系统信噪比对应的有效探测距离见图 3.当望远镜视场角为 0.5 mrad,太阳背景光能量密度为  $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 、 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 、 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  (SNR=10)时<sup>[19-20]</sup>,266 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 710 m、630 m、590 m;355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 530 m、400 m、330 m.望远镜视场角为 0.3 mrad,太阳背景光能量密度

为  $10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  ( $\text{SNR}=10$ )时,266 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 870 m、790 m、740 m;355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 680 m、520 m、440 m.结果表明,太阳背景光、激发波段和望远镜视场角的大小可以影响系统的探测性能.对于 266 nm 的激发波段太阳背景光的变化对其探测性能影响很小,望远镜视场角在 0.5 mrad 和 0.3 mrad 下其有效探测距离分别可达 710 m 和 870 m.表 4 为不同太阳背景光下改变视场角时系统的有效探测距离.而对于 355 nm 太阳背景光能量密度的变化影响十分显著,两种不同的望远镜视场角下最大有效探测距离仅为 530 m 和 680 m.说明太阳背景光对系统探测性能能够产生严重的影响,并且减小望远镜视场角有助于改善系统的探测效果.

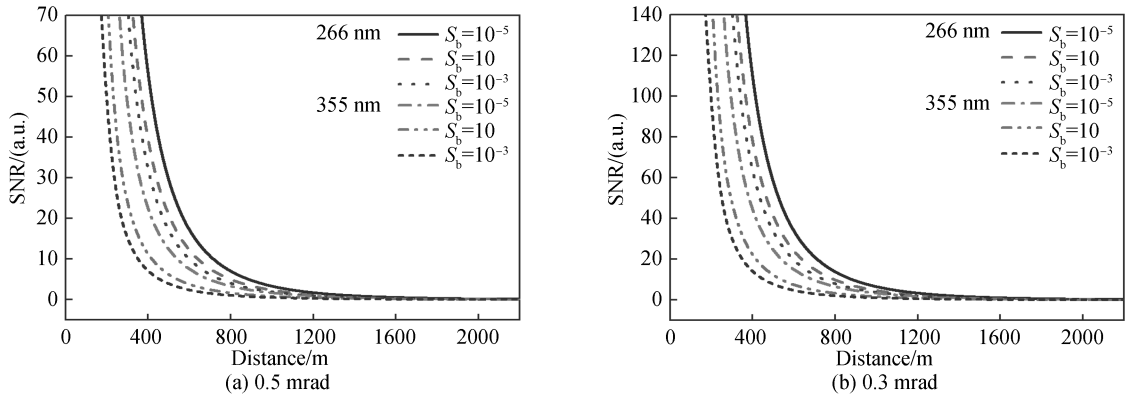


图 3 两种望远镜视场角下不同太阳背景光时系统的信噪比  
Fig.3 SNRs with the different solar background light at two field angle of telescopes

表 4 不同太阳背景光下改变视场角时系统的有效探测距离 ( $\text{SNR}=10$ )

Table 4 Effective detection range of the system with different FOV under different solar background light

External condition/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1})$		$10^{-5}$	10	$10^3$
0.5 field angle/mrad	266 nm	710 m	630 m	590 m
	355 nm	530 m	400 m	330 m
0.3 field angle/mrad	266 nm	870 m	790 m	740 m
	355 nm	680 m	520 m	440 m

改变滤光片带宽,假定望远镜视场角为 0.3 mrad,在不同太阳背景光的情况下不同紫外波段激发生物气溶胶荧光雷达系统信噪比对应的有效探测距离见图 4.当滤光片带宽为 30 nm,太阳背景光能量密度为  $10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  ( $\text{SNR}=10$ )时,266 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 830 m、790 m、760 m;355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 710 m、520 m、440 m.滤光片带宽为 50 nm,太阳背景光能量密度为  $10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ 、 $10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  ( $\text{SNR}=10$ )时,266 nm 波段激发生

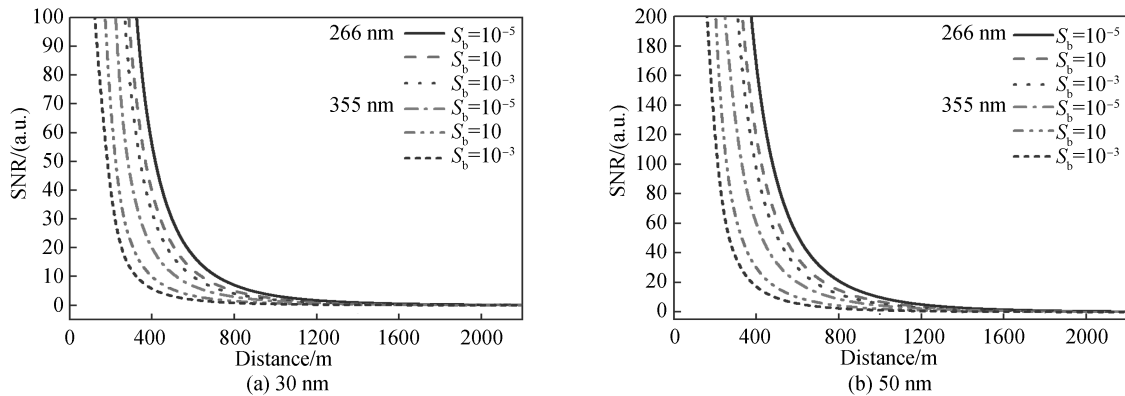


图 4 两种滤光片带宽下不同太阳背景光时系统的信噪比  
Fig.4 SNRs with the different solar background light at two filter bandwidth

物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 990 m、900 m、840 m；355 nm 波段激发生物气溶胶荧光雷达系统的有效探测距离分别为 760 m、590 m、480 m。结果表明，太阳背景光、激发波长和滤光片带宽的大小可以影响系统的探测性能。对于 266 nm 的激发波段太阳背景光的变化对其探测性能影响不大，滤光片带宽在 30 nm 和 50 nm 下其有效探测距离分别可达 830 m 和 990 m 之间。而对于 355 nm 太阳背景光能量密度的变化影响十分显著，两种不同的滤光片带宽下有效探测距离分别可达 710 m 和 760 m。并且在太阳背景光能量密度一定时，增大滤光片带宽有助于提高系统的探测性能。表 5 为不同太阳背景光下改变滤光片带宽时系统的有效探测距离。

表 5 不同太阳背景光下改变滤光片带宽时系统的有效探测距离 (SNR=10)

External condition/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )		$10^{-5}$	10	$10^3$
30 Bandwidth/nm	266 nm	830 m	790 m	760 m
	355 nm	710 m	520 m	440 m
50 Bandwidth/nm	266 nm	990 m	900 m	840 m
	355 nm	760 m	590 m	480 m

将 266 nm 和 355 nm 两种激发波长进行比较，在同等条件下且 SNR=10 时，355 nm 比 266 nm 有效探测距离远，但 266 nm 激发波段受太阳背景光强度影响较小，355 nm 对实验系统的选材要求较高，最终选望远镜接收视场角为 0.3 mrad，滤光片带宽为 50 nm 时，在强太阳背景光下，其最大有效探测距离仅为 480 m，而 266 nm 激发波段在同样条件下可达 840 m，因此选用 266 nm 激发波段可以有效避免太阳背景光的影响。

### 3 短波 266 nm 激发下的系统信噪比

为检验 266 nm 激发波长下系统的探测效果，白天和黑夜分别代表  $10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  和  $10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  的太阳背景光，随着探测距离的变化，其臭氧浓度也有所变化。图 5 是臭氧浓度随距离的变化曲线及 266 nm 波长的大气透过率曲线。266 nm 波长易被臭氧吸收，臭氧会对 266 nm 波长的大气透过率产生很大的影响。由图 5 可知，与不考虑臭氧吸收的影响时相比，266 nm 波长大气透过率显著降低，大气透过率可表示为

$$T(z) = \exp\left\{-\int_0^z [\gamma(\lambda_1, z') + N(z') \cdot \sigma(\lambda_1) + \gamma(\lambda_2, z') + N(z') \cdot \sigma(\lambda_2)] dz'\right\} \quad (6)$$

式中， $\lambda_1$  为激发波长， $\lambda_2$  为荧光波长， $N(z') \cdot \sigma(\lambda_1)$  和  $N(z') \cdot \sigma(\lambda_2)$  为臭氧对 266 nm 激发脉冲信号及 295 nm 荧光回波信号的吸收系数。

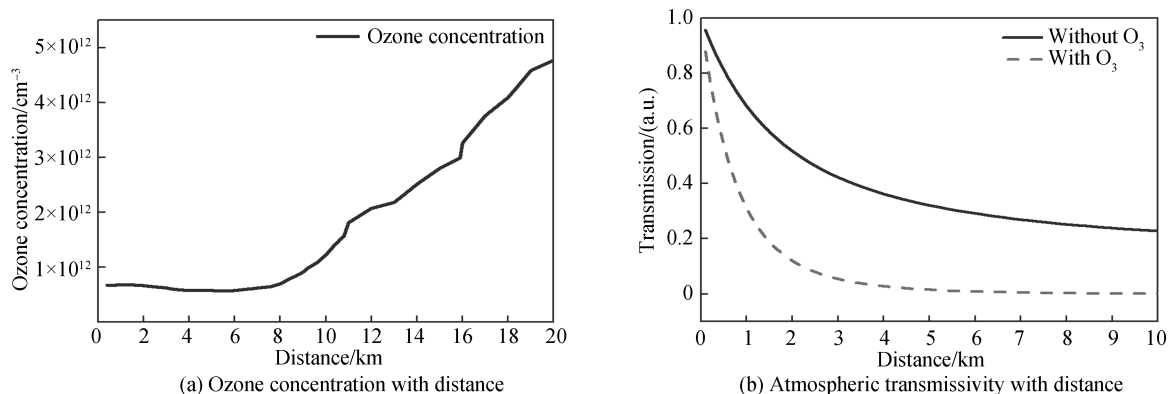


图 5 臭氧浓度及大气透过率随距离的变化关系

Fig.5 Variation of ozone concentration and atmospheric transmissivity with distance

细胞活性以及湿度的影响对生物气溶胶的探测干扰非常严重，同一种生物气溶胶不同的处理方法其荧光散射截面积有较大的差别。为检验短波 266 nm 激发时系统的探测性能，设白天和夜晚太阳背景光能量密度分别为  $10^3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$  和  $10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ ，当望远镜接收视场角为 0.3 mrad，滤光片带宽为 50 nm 时，改变生物气溶胶荧光截面，计算得到 266 nm 激发波长下白天和夜晚系统探测到的荧光信号信噪比廓线见图 6。

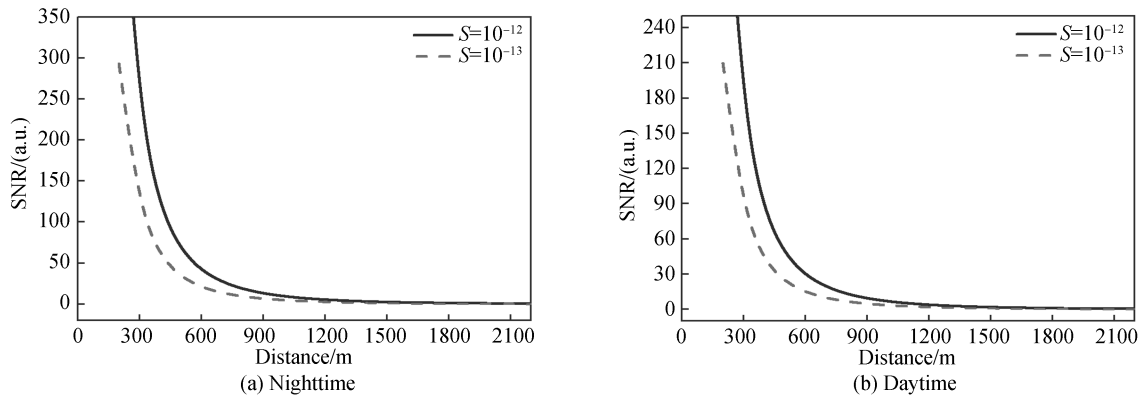


图6 266 nm 激光激发下的信噪比  
Fig.6 SNRs with 266 nm laser excitation

由图6可知,在白天(SNR=10),荧光散射截面积为 $10^{-13}$  cm<sup>2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>和 $10^{-12}$  cm<sup>2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>时<sup>[21]</sup>,其有效探测距离分别为690 m和880 m;在夜晚(SNR=10),荧光散射截面积为 $10^{-13}$  cm<sup>2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>和 $10^{-12}$  cm<sup>2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>时,其有效探测距离分别为780 m和990 m.结果表明,太阳背景光对266 nm波长的影响并不大,不同的生物荧光散射截面积会很大程度影响雷达系统的有效探测距离.

## 4 结论

为了分析臭氧和太阳背景光对荧光激光雷达系统在两种不同激发波长下的影响,构建了用于生物气溶胶探测的不同紫外波段荧光激光雷达系统.该系统解释了臭氧浓度及太阳背景光对生物气溶胶有效探测距离的影响程度,对系统进行了一系列的数值仿真.仿真结果得出了臭氧浓度大小和激光激发波长的大小会很大程度影响系统的探测效果,臭氧浓度的变化对266 nm激光激发下的影响程度较大,而对355 nm波长基本上没有影响.此外,白天存在太阳背景光,因此白天对长波355 nm的激发波长影响较大,探测效果不好.总体上看,夜晚的探测效果比白天探测效果好.且单独对266 nm波段进行分析可以得到荧光非弹性散射截面积越大,系统的探测效果越好.

### 参考文献

- [1] 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]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12436-12457.
- [2] MARCHANT C C, WOJCIK M D, BRADFORD W J. Estimation of aerosol effective radius by multiwavelength elastic lidar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(2): 645-660.
- [3] GILLILLES R, NATHALIE R. Aerosol size determination based on Multiple-Field-Of-View of elastic scattering[M]. *Bioaerosol Detection Technologies*, Springer New York, 2014: 301-314.
- [4] ZHANG Jin-ye, GONG Wei, HUANG Chu-yun, *et al.* Measurements of aerosol optical properties by raman lidar[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1340-1344.  
张金业,龚威,黄楚云. Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1340-1344.
- [5] ZOU Bing-fang, ZHANG Yin-chao. Multi-wavelength fluorescence lidar detection of bioaerosols[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**: 007-2276.  
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**: 007-2276.
- [6] EVERSOLE J D, SCOTTO C S, SPENCE M, *et al.* Continuous bioaerosol monitoring using UV excitation fluorescence [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2003, **4829**: 532-533.
- [7] LAN Tian-ge, XIONG Wei, FANG Yong-hua, *et al.* Study on passive of biological aerosol with Fourier-transform infrared spectroscopic technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1656-1661.  
兰天鸽,熊伟,方勇华. 应用被动傅里叶变换红外光谱技术探测生物气溶胶研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1656-1661.
- [8] WANG Wei, FU Hong-lei, WANG Ting-lu, *et al.* Characteristics of microbial aerosols on haze days in Autumn in Xi'an, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(01): 279-288.  
王伟,付红蕾,王延路,等. 西安市秋季灰霾天气微生物气溶胶的特性研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(01): 279-288.
- [9] 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.

- [10] CHRISTESEN S D. UV-fluorescence lidar detection of bioaerosols [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1994, **2222**: 228-237.
- [11] BAXTER K, CASTLE M, BARRINGTON S, *et al.* UK small scale UVLIF lidar for standoff bw detection[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007, 6739.
- [12] FENG Chun-xia, HUANG Li-hua, WANG Jian-bo, *et al.* Theoretical studies on bioaerosol particle size and shape measurement from spatial scattering profiles[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(9): 092901.
- [13] LI Zhan-feng, WANG Rui-wen, DENG Hu, *et al.* Laser induced breakdown spectroscopy of Cu in *Coptis chinensis*, *Aconite* root and *Poria cocos*[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(1): 100-105  
李占锋,王芮雯,邓琥,等. 黄连、附片和茯苓内铜元素激光诱导击穿光谱分析[J]. 发光学报,2016,**37**(1):100-105.
- [14] WAN Wen-bo, HUA Deng-xin, 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.
- [15] GAO Xue-xi, WANG Wen-jun, LIU Yun-long, *et al.* Preparation and spectral properties of spirofluorene oxygen complex LB films[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(3): 315-320  
高学喜,王文军,刘云龙,等. 螺芴氧杂蒽 LB膜的制备及光谱特性研究[J]. 发光学报,2016,**37**(3):315-320.
- [16] JING Min, HUA Deng-xin, LE Jing. Simulation study on surface oil pollution detection by fluorescence lidar technology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(7): 070704.  
景敏,华灯鑫,乐静. 荧光激光雷达技术探测水面油污污染系统仿真研究[J]. 物理学报,2016,**65**(7):070704.
- [17] 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.
- [18] ZHOU Qian-ting, WEI Jun, XU Zhi-peng. 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.
- [19] RAO Zhi-min, HUA Deng-xin, HE Ting-yao, *et al.* Design and simulation of laser induced bio-aerosols fluorescence lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(10): 1028001.  
饶志敏,华灯鑫,何廷尧,等. 激光诱导生物气溶胶荧光雷达的设计与数值仿真[J]. 光学学报,2015,**35**(10):1028001.
- [20] CHI Ru-li, LIU Bo, ZHONG Zhi-qing, *et al.* Dual-FOV Mie lidar observations of tropospheric aerosol [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2391-2396.  
迟如利,刘博,钟志庆,等. 双视场米散射激光雷达探测对流层气溶胶[J]. 光子学报,2009,**38**(9):2391-2396.
- [21] 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-3laborator[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 8165-8189.