

荧光偏振短距激光雷达测量生物战剂/气溶胶

杨 辉¹, 赵雪松², 孙彦飞¹, 王铁栋¹, 叶结松¹

- (1. 中国人民解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 基于激光诱导荧光(LIF)原理和弹性散射作用于非球形粒子上产生的偏振特性, 设计研制了短距测量荧光和偏振激光雷达: 采用了三个激光光源、两个接收望远镜、一个退偏组件和一个荧光光谱特征分析光谱仪, 设计遥测探测距离为 200 m 至数千米。荧光测量采用了 Nd:YAG 激光器的三倍频 355 nm 和 4 倍频 266 nm 输出, 激光束脉冲宽度约为 6 ns, 重复频率为 20 Hz, 荧光接收光学及光谱分析子系统由 25.0 mm 口径的 $f/4$ 牛顿望远镜, 车尔尼特纳光谱仪和 32 通道的光电倍增管(PMT)等组件组成; 偏振和弹性散射信号由孔径 12.5 mm 的卡塞格林望远镜接收。荧光测量的信噪比仿真计算表明: 以最小 $SNR=10$ 作为参照, 在 1 km 距离上, 白天探测不到浓度为 10 000 个/升的战剂云团, 但在夜间则可以获得较好的信号强度; 偏振测量结果初步分析表明: (1) 退偏比表现出较强的波长依赖性; (2) 多波长退偏比测量可以显著提高生物战剂的鉴别能力。

关键词: 生物战剂; 激光雷达; 荧光; 退偏比; 测量; SNR

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.1030004

Bio-agents and aerosol measurement by fluorescence and depolarization short-distance lidar

Yang Hui¹, Zhao Xuesong², Sun Yanfei¹, Wang Tiedong¹, Ye Jiesong¹

- (1. Army Officer Academy, The Chinese People's Liberation Army, Hefei 230031, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on two independent physical phenomena: laser induced fluorescence(LIF) and depolarization resulting from elastic scattering on non-spherical particles, a short range lidar system for real-time standoff detection of bio-agents was developed. The lidar system included three laser sources, two receiving telescopes, one depolarization component and fluorescence spectral signature analyzing spectrograph. It was designed to provide the stand-off detection capability at ranges from 200 m up to several kilometers. For fluorescence excitation, 3rd (355 nm) and 4th (266 nm) harmonics of Nd:YAG pulsed lasers were used. They emitted short (about 6 ns) pulses with the repetition frequency of 20 Hz. Collecting optical system for fluorescence echo detection and spectral content analysis included 25.0 mm diameter $f/4$ Newton telescope, Czerny Turner spectrograph and a 32-channel PMT. The depolarization

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(41375026)

作者简介: 杨辉(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要从事生物气溶胶、激光雷达和大气环境监测等方面的研究。

Email: sanpedroman@163.com

and Mie echo signal were collected by a Cassegrain telescope with an aperture diameter of 12.5 mm. Through the simulative calculation of SNR of fluorescence measurement, it was found that, with the minimum detectable SNR value of 10 as reference, the bio-agent cloud with concentration of 10 000 ACPLA at the distance of 1 km could not be detected in daytime, while a rather good signal intensity could be obtained in nighttime. The preliminary analysis to the depolarization measurement results indicated that: (1) the depolarization ratios were wavelength-dependent; (2) depolarization measurement using multiple wavelengths could increase discrimination efficiency significantly.

Key words: bio-agents; lidar; fluorescence; depolarization ratio; measurement; SNR

0 引言

生物战剂遥测的目标旨在一定距离上对目标生物战剂粒子进行非接触测量和识别。激光诱导荧光激光雷达是主动式遥测技术的主要途径之一,可以侦测生物战剂的多个属性,但与传统激光雷达相比,其技术复杂程度高,造价高昂,主要体现在:(1) 荧光是非弹性散射过程,其激励波长普遍位于紫外波段,辐射则在较长波长上以带宽辐射形式呈现;激光束在传输路径上被大气严重散射或吸收,其能量在达到目标前衰减严重。(2) 荧光辐射信号受天空杂散光影响严重,白天探测时探测器易饱和。(3) 荧光散射截面较弹性散射要小数个数量级,探测器接收到的荧光信号极其微弱。所以,荧光激光雷达的设计和高效探测面临着极大的挑战。

悬浮在空气中的均质液态气溶胶滴一般呈球形,均匀的球形散射恰恰在 180° 方向上不会形成退偏振辐射,而形状不规则的固体颗粒则会产生显著的退偏振效果。形状不规则固体颗粒造成的入射光退偏振情况会随着表面光洁度和悬浮微粒的折射率变化。所以,除荧光外,偏振也是生物战剂遥测的有力手段之一。绝大多数生物战剂粒子内部结构复杂,形状不规则,其退偏比也是生物战剂类型识别的重要判定数据。

目前,有关生物气溶胶退偏振和荧光特征的报道信息非常少。赵一鸣等通过求解 Mueller 矩阵及偏振度,讨论了散射介质的粒子数浓度对散射光偏振度的影响^[1];邹炳芳等^[2]对多波长荧光激光雷达生物气溶胶测量进行了数值模拟计算;兰天鸽^[3]等建立了包含散射影响的生物气溶胶被动红外探测模型,并对微生物孢子气溶胶探测试验结果进行了讨

论;蔡舒窈^[4]等基于本征荧光测量技术,研制完成了一套针对包括病毒气溶胶在内的生物气溶胶本征荧光测量和检测装置,提出了一种生物气溶胶检测与标定方法;顾有林^[5]等基于米/Mie 散射理论求出了灭活前后黑曲霉孢子红外波段的质量消光系数;吴太虎^[6]等设计的痕量微生物快速扫描检测系统,实现了对痕量微生物样本的快速检测。

文中对自行设计研制的荧光/偏振激光雷达进行了性能估算,并对偏振实验结果进行了讨论,证明了荧光和偏振测量的可行性。

1 激光诱导荧光测量原理

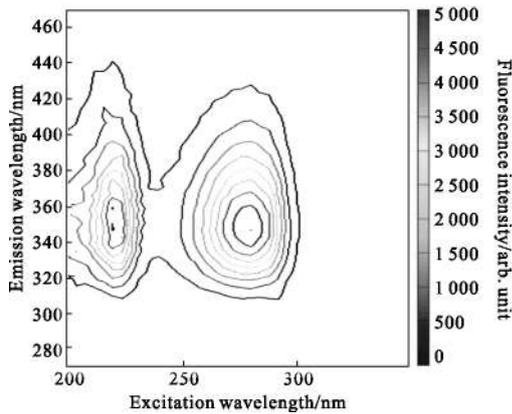
1.1 生物粒子的激光诱导荧光特性分析

绝大多数生物粒子在紫外光的激励下会辐射出荧光。对荧光生物粒子而言,基于其内部组成成分的种类和数量,其荧光过程会产生独特的光谱特征^[7-8]。生物蛋白中的氨基酸,比如色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸的吸收带主要位于 280~290 nm 波长范围内,荧光辐射波长区间则为 300~400 nm;而细胞新陈代谢相关的因子,如还原型辅酶烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 NADH 和核黄素维生素 B2(VB2)的主要吸收波长则位于 345 nm 附近,荧光辐射波长区间则为 440~550 nm;孢子中的吡啶二羧酸 DPA 紫外吸收峰位于 340 nm 附近,荧光辐射波长区间则为 400~450 nm。

生物战剂粒子的荧光辐射是上述荧光组分的种类和数量的不同组合,亦即其荧光指纹。2、3 维荧光强度谱是描述荧光谱的常用方法,其坐标分别为激励波长 λ_{exc} 和发射波长 λ_{ems} 。图 1 示出了色氨酸、VB2、毒杆菌以及牛血清蛋白等典型分子荧光团及生物战剂模拟物的 3 维荧光分布,从图中可以分析

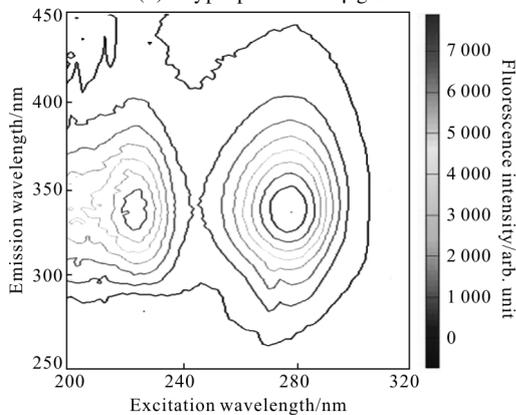
出明显的区别及相似之处:色氨酸和牛血清蛋白(全组分)的荧光谱 2 维分布几乎完全一致,激发/发射中心波长位于 280/350 nm 附近,只是牛血清蛋白的激发波长向紫外短波方向移动了 3 个 nm;VB2 的荧光峰位于 370/525 nm 处;从肉毒杆菌的荧光分布可知,色氨酸和苯丙氨酸的两个荧光峰十分微弱,酪氨酸两个峰明显,另有两个较强的峰位于 240/400 nm 和 320/400 nm;色氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸的荧光谱相互重叠严重,NADH、VB2、黄素单核苷酸 FMN 和黄素腺嘌呤二核苷酸 FAD 等的荧光谱分布也存在重叠。

当然,图 1 中荧光谱的获取,必须通过连续的荧光激励才能实现,而远程遥测系统中,一般配备一两台激光器,发射 1~3 个波长的紫外和红外激光,其中紫外波长用于探测荧光,而红外波长用于探测浓度和空间分布特征。遥测系统对生物战剂的识别较为困难,浓度探测利用 Mie 散射实现相对容易。



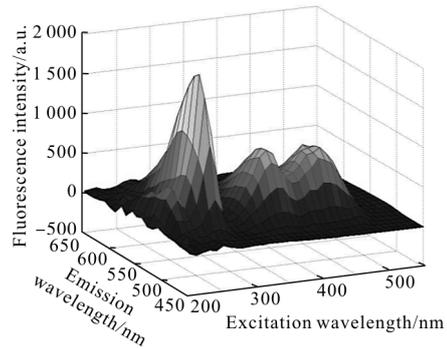
(a) 色氨酸 @80 µg/L

(a) Tryptophan @80 µg/L



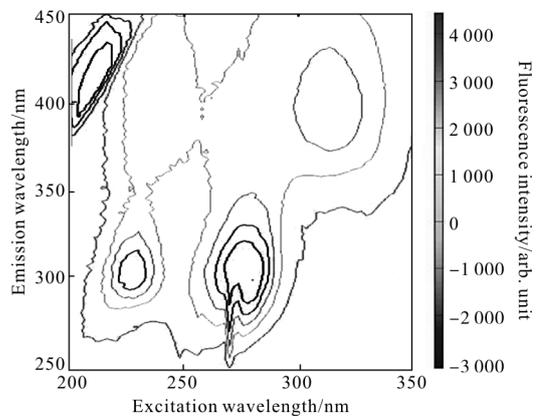
(b) 牛血清蛋白(全组分)

(b) Bovine serum albumin(all component)



(c) 核黄素 @60 µg/L

(c) Riboflavin@60 µg/L



(d) 肉毒杆菌

(d) Botulinum

图 1 典型生物荧光组分、战剂模拟物的荧光分布

Fig.1 Fluorescence distributions of typical bioluminescence component and bio-agents simulant

1.2 荧光截面

荧光截面 σ 是生物战剂/气溶胶的重要参数,其计算和标定是荧光激光雷达信号测定和处理的前提条件。若激光雷达光电倍增管(PMT)的输出信号 S 可用下式给出:

$$S = V\eta\omega C I_{inc} \int \frac{d(\sigma)\lambda}{d\lambda} FPd\lambda \quad (1)$$

式中: V 为探测体元; η 为探测器效率因子; ω 为 PMT 信号亮度阳极输出亮度值; C 为粒子浓度; I_{inc} 为入射激光束的辐照度; λ 为波长; F 为辐射带通函数; P 为 PMT 的光谱响应参数。

荧光激光雷达系统中 PMT 的典型光学常数如表 1 所示。

表 1 PMT 光学常数

Tab.1 PMT optical property constants

Constants	V/m^3	η	$\omega/A \cdot W^{-1}$	$C/cfu \cdot m^{-3}$	$I_{inc}/W \cdot m^{-2}$
Value	3.14×10^{-9}	0.20	1.4×10^5	1×10^4	2.4×10^{12}

文中以球芽孢杆菌的荧光截面 σ 为基准, 计算得到了部分生物战剂模拟物的荧光截面, 如表 2 所示^[7]。由于荧光截面测量时, 粒子计数的误差较大, 加之粒子液态和气溶胶态等形态上的区别, 导致荧光截面的数据有一定的出入。

表 2 典型生物战剂模拟物在 266~280 nm 区间的荧光截面

Tab.2 Fluorescence cross-section of typical B-agent simulants for excitation 266~280 nm

Type	Excitation wavelength λ_{exc}/nm	State	$\sigma/cm^2 \cdot particle^{-1}$
Escherichia coli in vivo	270	Liquid suspension	1.5×10^{-10}
Escherichia coli in vivo	280	Liquid suspension	8.1×10^{-11}
Bacillus subtilis in vivo	270~280	Liquid suspension	7.5×10^{-10}
Bacillus subtilis in vivo	270	Liquid suspension	2.9×10^{-11}
Bacillus spore	266	Liquid suspension	5.4×10^{-12}
Bacillus spore	266	Aerosol	2.2×10^{-11}

激光雷达遥测生物战剂的另一个问题是如何选择合适的激发波长。由图 1 和荧光团的激发和发射谱可知, 280 nm 和 340 nm 波长是最合适的激励波长, 受商业激光器的限制, 一般选择 Nd:YAG 的 3 倍频或 4 倍频激光输出。

2 激光雷达系统

2.1 激光雷达结构设计

图 2 示出了荧光、偏振测量激光雷达的功能和结构图。激光光源包括三个激光器, 一个人眼安全 Nd:YAG OPO 激光器, 工作波长为 1 574 nm, 用于弹性后向散射; 另外两个 Nd:YAG 激光器输出 2 倍

频 532 nm、3 倍频 355 nm、4 倍频 266 nm 波长激光, 分别用于荧光激发和偏振测量。采用了两个接收望远镜, 牛顿望远镜($D_0=25.0$ mm)用于接收荧光信号, 而卡塞格林望远镜($D_0=12.5$ mm)用于接收弹性散射信号。

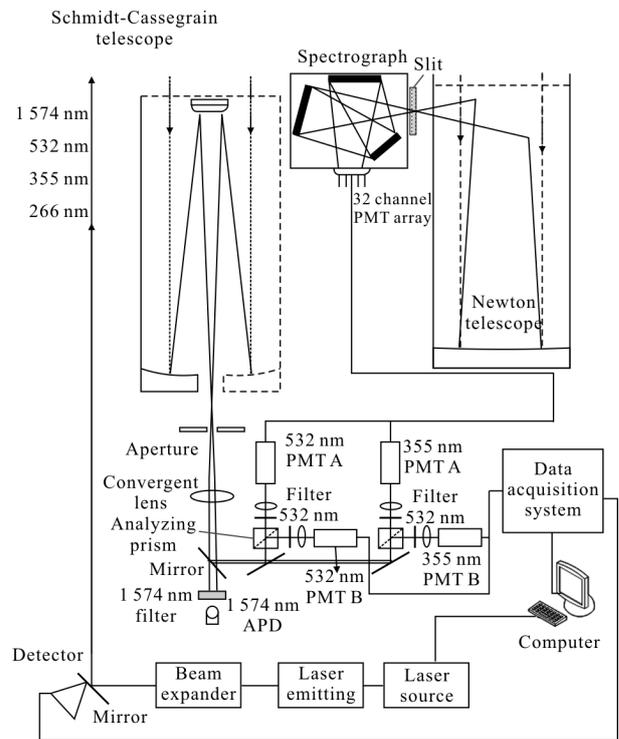


图 2 激光雷达功能结构图

Fig.2 Functional scheme of the lidar

其中, 生物战剂粒子或气溶胶辐射的荧光经牛顿望远镜采集后, 输送至车尔尼特纳 Czerny-Turner 光谱仪, 经分光后聚焦到 32 通道 PMT, 该 PMT 的光谱响应范围为 300~900 nm, 32 个阳极信号分别送至数据采集模块进行处理。在采集前, 各通道的增益分别通过安捷伦 LED 发光二极管 HLMP-CB26-SV000 进行定标, 平均标准偏差为 7%。由于弹性散射光强度较荧光强数个数量级, 因此为保证荧光的顺利接收, 必须将弹性散射光阻挡在光谱仪入口狭缝之前。近红外激光产生的弹性散射光由 APD 探测器探测, 其中 532 nm 和 355 nm 后向散射光分别由检偏棱镜起偏后进行分光, 相互正交的偏振散射数据由各自 PMT 接收。激光雷达的主要参数如表 3 所示。

表 3 短程测量激光雷达的典型技术参数
Tab.3 Main specifications of short-range measurement lidar

Laser	Nd:YAG, Nd:YAG OPO
Emitting wavelength/nm	266, 355, 532, 1 574
Pulse energy/mJ	10@355 nm, 15@532 nm, 25@1 574 nm
Repetition frequency/Hz	20
Pulse width/ns	6
Beam divergence angle/mrad	<4
Telescope	Schmidt-Cassegrain, Newton
Diameter/mm	Newton/25, Schmidt-Cassegrain/12.5
Field of view/mrad	2-3 adjustable
Quantum efficiency of PMT	0.2
Filter central wavelength/nm	355-P, 355-S, 532-P, 532-S, 387(Raman)
Fluorescence wavelength range/nm	300-460
Photodetector	Ultraviolet PMT PM-HV-03@532, 355-P, 355-S, InGaAs APD@1 574 nm
Filter central wavelength and width/nm	531.9/0.5±0.05, 355.3/1±0.05
Filter transmittance	531.9/48%, 355.3/54%

2.2 荧光激光雷达探测距离估计

为估算荧光激光雷达的有效探测距离，构建了信噪比的数学模型，影响因子包括大多数环境变量和设备参数变量，主要包括以下三种类型：(1)接收到的光学信号的能量水平；(2)达到探测器表面的总光学信号的能量水平(包括噪声)；(3)探测器噪声。

在距离 Z 处，系统接收到的辐射波长上的荧光回波信号，用荧光雷达方程表示为^[9-10]：

$$T(Z, \lambda_{\text{ems}}) = \frac{E_0 c}{2} T(Z, \lambda_{\text{exc}}) T(Z, \lambda_{\text{ems}}) \frac{A_0}{Z} \zeta_Z(Z) \sigma \cdot \sigma^f(\lambda_{\text{exc}}, \lambda_{\text{ems}}) K_0(\lambda_{\text{ems}}) \zeta_\lambda(\lambda_{\text{ems}}) N(Z) \quad (2)$$

式中： E_0 为激光脉冲能量； c 为光速； A_0 为接收孔径面积； ζ_Z 为几何重叠因子； $\sigma^f(\lambda_{\text{exc}}, \lambda_{\text{ems}})$ 为 λ_{exc} 和 λ_{ems} 处的荧光差分截面； $K_0(\lambda_{\text{ems}})$ 为滤波函数； $\zeta_\lambda(\lambda_{\text{ems}})$ 为接收光学系统的光谱透过率； $N(Z)$ 为距离 Z 处生物战剂的浓度； $T(Z, \lambda)$ 为波长 λ 上到距离 Z 的透过率。

$$T(Z, \lambda) = \exp \left[\int_0^Z -\gamma(x, \lambda) dx \right] \quad (3)$$

式中： γ 为消光系数。

由于环境背景与荧光谱带重叠，日间测量时对荧光激光雷达的性能形成了严重干扰，尤其是在阳光明媚的天气条件下。图 3 示出明朗天气下的天空背景杂散光辐亮度 $S_b(\lambda)$ 随波长分布情况，其最大值约为 $S_b = 2.2 \times 10^{-2} \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 。

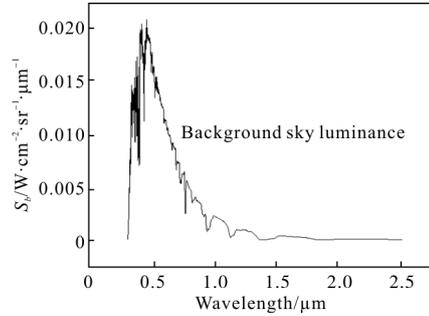


图 3 背景杂散光的波长分布(美国标准大气模式,晴天、中午,海平面,中纬度、太阳天顶角 30°,观测方向与太阳天顶角之差:90°)

Fig.3 Wavelength distribution of background sky stray light (US Standard Atmosphere, sunny weather, mid-day, sea level, mid-latitude, solar azimuth:30°, angle between solar azimuth angle and observation direction:90°)

PMT 电流背景噪声 i_b 由下式给出^[11]：

$$i_b = S_b(\lambda) \Omega_0 A_0 K_0(\lambda) \eta(\lambda) e \frac{\lambda}{hc} \quad (4)$$

式中： Ω_0 为探测器视场角； $\eta(\lambda)$ 为 PMT 阴极的量子产率； e 为电荷； h 为普朗克常数。根据表 1 中的散射截面数据和天空背景光数据 $S_b = 10^{-2} \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ ，可得到 PMT 的阴极电流为 2.5 nA，经放大 10^6 倍后输出为 2.5 mA，超出了绝大多数 PMT 的线性放大区间。

$$SNR = \frac{i_s}{i_n} = \frac{i_s}{\sqrt{2eB(i_s + i_b + i_d)}} \quad (5)$$

式中： i_n 为光电阴极的背景杂散噪声，它的三个来源为信号电流，背景电流 i_b 和暗电流 i_d ； B 为探测器的频率带宽； i_s 为荧光回波信号产生的 PMT 光电阴极电流。

$$i_s = P(Z, \lambda_{\text{ems}}) \eta(\lambda_{\text{ems}}) e \frac{\lambda_{\text{ems}}}{hc} \quad (6)$$

为提高信器噪比，激光雷达一般采用信号时间累积或积分的方式，这样信噪比为：

$$SNR_{av} = SNR \cdot \sqrt{n} \quad (7)$$

式中： n 为脉冲数量。综上，输出的信噪比由下式给

出:

$$SNR_{av}(Z)=$$

$$\frac{P(Z,\lambda)\eta(\lambda)e^{\frac{\lambda}{hc}}\sqrt{n}}{\sqrt{2eB(P(Z,\lambda)\eta(\lambda)e^{\frac{\lambda}{hc}})+S_b(\lambda)\Omega_0A_0K_0(\lambda)\eta(\lambda)e^{\frac{\lambda}{hc}}+i_d)}} \quad (8)$$

若累积更多的脉冲数量,可以提高信噪比,但信号积分时间太长,战剂云团的形状变化和位置移动等动态信息会被忽略,所以信号累积次数一般在 500 个脉冲左右。图 4 示出了典型的信噪比曲线。

一般地,采用最小可探测 $SNR=10$ 作为信号可用程度的标准。荧光激光雷达的性能取决于战剂浓度、大气传输和背景杂散光条件,以及生物战剂粒子在探测波长上的荧光截面大小。

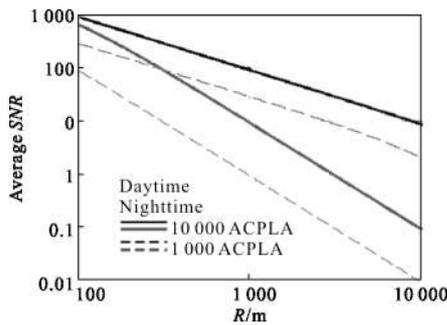


图 4 两种生物战剂浓度、两种大气背景条件(夜晚、白天)下的信噪比分布,天气背景条件为:晴天、中午,海平面和中纬度

Fig.4 Signal to noise ratio as a function of range for two concentrations of bio-agent under two atmospheric background light conditions(sunny daytime, nighttime). Weather background condition is sunny weather, mid-day, sea level and mid-latitude

由图 4 可知,在白天对数浓度为 10 000 个/升 (Agent Containing Particle per Liter of Air, ACPLA)的战剂云团进行探测,几乎是不可能的,但在夜间或多云的白天则可以实现。在背景允许情况下,对 1 km 距离上、浓度为 1 000 ACPLA 的战剂云团,也可以得到较好的信号强度。

系统探测性能的提升可通过调整系统参量实现,如接收孔径面积、激光束能量、合适的激发波长、光束发散角,波长透过率以及接收视场等。

3 偏振测量技术

3.1 原理

除荧光外,偏振信息也是激光雷达测量、分析和判定生物战剂的重要参数。绝大多数生物粒子和细菌孢子具有不规则的外部形状和复杂的内部结构,入射激光的偏振现象明显。采用 8 种花粉作为生物战剂模拟物进行了偏振测量。参考 Schotland^[12]和 Gimmetstad^[13]的研究,激光雷达水平方向上的退偏比定义为:

$$\delta_H(z)=\frac{P_{H\perp}(r,z,\beta=\pi)}{P_{H//}(r,z,\beta=\pi)}=\frac{P_{H\perp}(z)}{P_{H//}(z)} \quad (9)$$

式中: $P_{H\perp}(r,z,\beta=\pi)$ 和 $P_{H//}(r,z,\beta=\pi)$ 代表与入射激光束垂直和平行的相函数; r 为粒子粒径; z 为探测距离; $P_{H\perp}(z)$ 和 $P_{H//}(z)$ 分别为望远镜接收到的回波垂直分量和平行分量。综合各通道接收到的回波信号 $P_{D1,H\perp}(z)$ 和 $P_{D1,H//}(z)$,受探测器的响应函数 D_{R1} 和 D_{R2} 、光学透过率 T_1 和 T_2 ,以及由镜面组产生的偏振参数 $\mathfrak{R}_{H\perp}$ 和 $\mathfrak{R}_{H//}$ 响应等系统硬件参数的影响,退偏比定义为:

$$\delta_H(z)=\frac{(z^2P_{D2,H\perp})T_1D_{R1}\mathfrak{R}_{H//}}{(z^2P_{D1,H//})T_2D_{R2}\mathfrak{R}_{H\perp}} \quad (10)$$

同样地,垂直方向上的退偏比为:

$$\delta_V(z)=\frac{(z^2P_{D1,V\perp})T_1D_{R2}\mathfrak{R}_{V//}}{(z^2P_{D2,V//})T_2D_{R1}\mathfrak{R}_{V\perp}} \quad (11)$$

由于生物战剂气溶胶在大气中随机散布,因而垂直和水平退偏比应该相等,即 $\delta_V=\delta_H=\delta_L$,所以整个雷达系统测得的退偏比为:

$$\delta_L(z)=\sqrt{\frac{(z^2P_{D1,V\perp})}{(z^2P_{D2,V//})}\frac{(z^2P_{D2,H\perp})}{(z^2P_{D1,H//})}\frac{\mathfrak{R}_{V//}/\mathfrak{R}_{H//}}{\mathfrak{R}_{V\perp}/\mathfrak{R}_{H\perp}}} \quad (12)$$

对两个通道进行标定后,公式(12)中的镜面组参数可以忽略,可得:

$$\delta_L(z)=\sqrt{\left(\frac{z^2P_{D1,V\perp}}{z^2P_{D2,V//}}\right)\left(\frac{z^2P_{D2,H\perp}}{z^2P_{D1,H//}}\right)} \quad (13)$$

扣除背景信号后,可得生物战剂气溶胶退偏比的空间分布和路径上的平均值:

$$\delta_L=\sqrt{\delta_V\delta_H} \quad (14)$$

3.2 近场测量与讨论

偏振测量在距离激光雷达 100 m 的喷雾型测量

腔中进行。气溶胶室长 22 m, 规模为 2.4 m × 2.4 m。两端配有活动门, 挂起时可以关闭, 放下时打开。测量顺序如下: (1) 室门关闭, 将选定的 2 g 花粉在几秒时间内利用气流式雾化器和风扇, 将生物气溶胶充分混合均匀, 并保留 10 s 以确保室内具有良好的各向同性; (2) 然后打开前门, 进行激光雷达测量; (3) 完成激光雷达数据采集后, 打开后门, 在数分钟内清空测量腔中的气溶胶。

图 5 示出了激光雷达近场测量获取的 8 种典型生物气溶胶粒子在 355 nm 通道和 532 nm 通道上的退偏比情况。从图中的退偏比数据分布可知, 不同样本的平均退偏振比存在较大的差异; 同一个样本, 不同波长上的退偏比也不同, 波长较短的退偏比数值较小, 其中, 4# 样本的 532 nm/355 nm 两个波长退偏比达到了 5.5。综合图 5 中的数据说明, 利用退偏比数据可以对生物战剂/模拟物进行初步的识别。

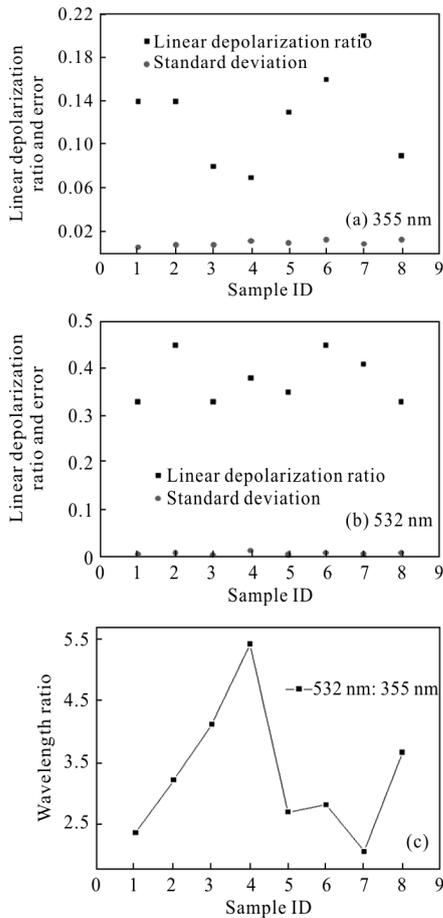


图 5 退偏比及波长比

Fig.5 Depolarization ratio and wavelength ratio

3.3 外场测量与讨论

图 6 中示出了偏振激光雷达 355 nm 通道的气溶胶退偏振比的时空分布图, 从图可知: 退偏振比基该呈两层结构, 即近地层退偏振比相对均匀, 高于近地层上, 近地层上散布着一些退偏振比较大的气溶胶云团, 这是由于气溶胶在部分高度上, 经凝结、聚合以及大气光化学反应等过程, 并在温度、湿度、气压、风向等影响下, 其形状和内部结构产生了较大变化。

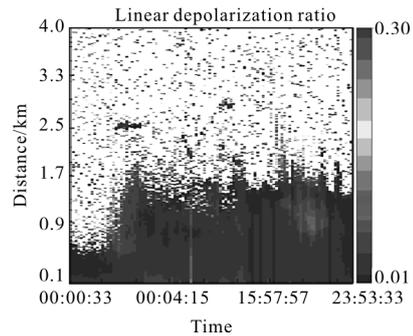


图 6 激光雷达的偏振比时空分布(355 nm)

Fig.6 Space and time distributions of linear depolarization ratio of lidar(355 nm)

4 结论

生物战剂/气溶胶的光学遥测和识别是当今生物化和光学领域研究的热点之一。基于生物战剂的激光诱导荧光和偏振光信息的测量, 荧光和偏振激光雷达可以有效地对生物战剂进行探测和识别。

荧光测量的信噪比模拟计算表明: 接收孔径面积、激光束能量、激发波长、光束发散角, 波长透过率以及接收视场等参数的综合优化等可以提高荧光测量的信号强度和分辨力^[14]。

偏振测量数据表明: (1) 退偏振率表现为波长依赖性; (2) 多波长退偏比测量可以显著提高生物战剂的鉴别能力。当然, 要提高生物战剂气溶胶/模拟物的荧光和偏振测量水平, 还需解决以下问题^[15-16]:

(1) 优化荧光测量激光雷达的结构, 提高 PMT 阵列的测量范围, 选择合适的激光器激发波长;

(2) 对生物战剂的偏振测量数据进行更细致分析, 计算出最优的偏振测量波长;

(3) 环境条件, 比如相对湿度等对荧光和偏振测量的影响。

参考文献:

- [1] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization character istic of the light scattered by the aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865. (in Chinese)
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 862-865.
- [2] Zou Bingfang, Zhang Yinchao. Multi -wavelength fluorescence lidar detection of bioaerosols [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 262-267. (in Chinese)
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.
- [3] Lan Tiange, Xiong Wei, Fang Yonghua, et al. Study on passive detection of biological aerosol with Fourier - transform infrared spectctroscopic technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1656-1661. (in Chinese)
兰天鸽, 熊伟, 方勇华, 等. 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.
- [4] Cai Shuyao, Zhang Pei, Zhu Linglin, et al. Research on detection technology of bioaerosols with tryptophan intrinsic fluorescence measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512009-1-6. (in Chinese)
蔡淑窈, 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): 0512009-1-6.
- [5] Gu Youlin, Wang Cheng, Yang Li, et al. Infrared extinction before and after aspergillus niger spores inactivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 36-41. (in Chinese)
顾有林, 王成, 杨丽, 等. 黑曲霉孢子灭活前后红外消光特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 36-41.
- [6] Wu Taihu, Mao Jiawen, Chen Feng, et al. Rapid trace microbia detection system [J]. *Optical and Precision Engeneering*, 2015, 23(11): 3061-3068. (in Chinese)
吴太虎, 毛佳文, 陈锋, 等. 痕量微生物快速检测系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(11): 3061-3068.
- [7] Lakowicz J R. Principles of Fluorescence Spectroscopy [M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisher, 1999.
- [8] Yang Hui, Xiao Xue, Zhao Xuesong, et al. Study on fluorecence spectra of thiamine, riboflavin and pyridoxine [C]//SPIE, 2015, 9903: 99030H-1-17.
- [9] Measures R M. Laser Remote Sensing. Fundamentals and applications [M]. New York: Krieger Publishing Company, 1992.
- [10] Simard J R, Roy G, Mathieu P, et al. Standoff sensing of bioaerosols using intensified range-gated spectral analysis of laser-induced fluorecence [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42: 865-873.
- [11] 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: 779-796.
- [12] Schotland R M, Sassen K, Stone R. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors [J]. *J Appl Meteorol*, 1971, 10: 1011-1017.
- [13] Gimmestad G G. Reexamination of depolarization in lidar measurements[J]. *Appl Opt*, 2008, 47: 3795-3802.
- [14] Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, et al. Development of three -wavelength -Raman -polarization lidar system and case study[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001-1-6. (in Chinese)
刘东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001-1-6.
- [15] Yang Zijian. Construction and key technology research of biological aerosol monitoring system based on laser radar technology [D]. Beijing: Military Medical Science Academy of the PLA, 2015. (in Chinese)
杨子健. 基于激光雷达技术的生物气溶胶监测系统构建与关键技术研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015.
- [16] Han Xue. Depolarization characteristic of aerosolsscattering in laser research [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
韩雪. 气溶胶散射对激光退偏特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.