文章编号:1001-5078(2016)11-1320-05

·激光应用技术·

生物战剂/气溶胶激光雷达遥测技术研究

杨 辉1,赵雪松2,孙彦飞1,王铁栋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:散射、荧光和偏振信息是生物战剂/气溶胶时空观测和识别的有效数据源。对 Mie 散射、紫外激光诱导荧光和偏振探测激光雷达的原理、数据反演等进行了阐述和讨论,并对消光 系数、荧光和退偏振比的探测结果进行了探讨。实验和数据表明,消光系数、退偏振比和荧光 的时空分布,用于生物战剂/气溶胶的探测和识别是可行的。

关键词:生物战剂/气溶胶;激光雷达;激光诱导荧光;退偏振比;米散射;遥测 中图分类号:TN247 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.11.004

Study on LIDAR remote sensing technology for biological agent/aerosol

YANG Hui¹, ZHAO Xue-song², SUN Yan-fei¹, WANG Tie-dong¹

(1. Army Officer Academy, HeFei 230031, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract:Scattering,fluorescence and polarization are the effective data sources for biological agent/aerosol time – space observation and identification. The theory and data inversion principles for Mie scattering, laser induced fluorescence and polarization sensing LIDAR were stated and discussed. The sensing and data inversion results for extinction coefficient, fluorescence and horizontal linear depolarization ratio of biological agent/aerosol were also demonstrated. The results show that the three kinds of detecting technologies are reasonable and potential for biological agent/aerosol detection and recognition.

Key words: biological agent/aerosol; LIDAR; laser induced fluorescence; depolarization ratio; Mie scattering; remote sensing

1 引 言

生物战剂是指可用于生物恐怖袭击和生物战中 的生物制剂和生物毒素,主要有细菌、病毒、立克次 氏体和生物毒素,能以极小的经济代价、隐蔽地感染 大面积的人员、动物、植物和其他生物,导致大规模 的伤亡。迄今为止,可制成生物武器的生物战剂种 类超过了1200种。生物战剂通过呼吸道、消化道摄 取和经皮肤沾染而造成人体危害,在基因工程的推 动下其威慑将比原子弹更可怕,对未经预防接种作 战人员所造成的死亡率几乎是100%。世卫组织估 计,50 kg的炭疽孢子袭击会导致约95000人死亡和 约125000人患病,10个以下的出血热病毒就可以 致人死亡,且对大多数生物战剂而言,人体的吸入量 少于10000个以下即可感染和传染^[1-5]。生物战剂 可通过污染的食品、水源或带病的昆虫(如苍蝇和 蚊子)进行传播,但以气溶胶形式传播的威力最大。

收稿日期:2016-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41375026)资助。

作者简介:杨 辉(1974-),男,副教授,博士,主要从事激光雷达研制和大气环境监测,光电子技术,嵌入式系统,移动计 算等领域的研究。E-mail:sanpedroman@163.com

生物战剂的及时、准确和精准探测是生物防御的基本要求,是实施掩蔽、疏散、隔离及早期医学处理等防护措施的前提。

基于采样技术的生物战剂/气溶胶探测识别技术复杂,时效性低,采样过程难以保持生物战剂的生物活性,脱水、紫外辐射、温度变化等因素也提高了 生物战剂的分析识别难度。

生物战剂激光雷达远程遥测技术具备点式采 样传感器探测所不具备的诸多优点,如探测范围 大、易于部署、可以探测战剂空间分布及演化特 征,为下风口的人员和设备等提供先期预警等;对 生物战剂的空间分布探测及跟踪,尤其是结合了 战剂云团建模技术后,可以对战剂威胁的类型性 质、浓度等参量进行探测,空间分布探测技术可以 确定生物袭击的投放点位置,为下一步的预防措 施及消毒行动提供预警信息和参数指导。例如, 在风速 20 km/h (10 kt)条件下,若激光雷达可以 探测上风口 2 km 的战剂云,人们可以得到约6 min 的预警时间^[6-7]。

Mie 散射战剂云团探测、激光诱导荧光探测和 偏振探测技术是生物战剂先期预警的三个主要技术 途径,本文仅对这三种生物战剂/气溶胶光学遥测的 技术路径、探测能力和技术局限进行了探讨和分析。

2 生物战剂/气溶胶激光雷达遥测原理

激光雷达生物战剂/气溶胶遥测基于出射激光 与粒子之间的各种物理过程,如分子瑞利(Rayleigh)散射、拉曼(Raman)散射、气溶胶粒子米 (Mie)散射等多种散射过程,以及在紫外或其他波 长上吸收激光能量并在较长波长上辐射激光的荧光 过程。生物物质内色氨酸、酪氨酸和苯基丙氨酸和 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 NADH 等组分,在紫外区强 吸收,荧光谱明显,NADH 和核黄素则在较长波长上 吸收能量并辐射荧光。

生物战剂/气溶胶粒子也可能是非球形粒子,在 一束线偏振光照射下,它们的后向散射光不再是线 偏振光,利用检偏镜和双路 PMT 等可以分别采集和 记录后向散射光中的垂直和平行分量,利用测量到 的退偏振比数据与数据库比对,来对生物战剂/气溶 胶粒子进行识别。

所以,Mie 散射激光雷达主要用于生物战剂/气 溶胶云团的搜索和定位、探明其时空分布,荧光激光 雷达可以探测并判定生物战剂/气溶胶云团的性质 类别,而偏振激光雷达利用退偏振比也可以初步确 定生物战剂/气溶胶云团的性质类别。

2.1 激光雷达的基本结构

图1给出了激光雷达的总体结构。它主要由激 光器,接收光学系统,信号探测系统和数据采集处理 系统组成。由于荧光信号比较弱,可用光子计数卡 接收,也可用增强型 CCD 和 PMT 接收。表1列出 了偏振/荧光激光雷达的主要技术参数。



图 1 偏振激光雷达探测原理 Fig. 1 Schematic diagram of bioagent/bioaerosol sensing lidar

表1 激光雷达的典型技术参数

Tab. 1 Main specifications of typical

bioaerosol sensing lidar

激光器	Nd : YAG		
波长/nm	355,532		
脉冲能量/mJ	50@355nm,40@532nm		
脉冲工作频率/Hz	20		
脉冲宽度/ns	5		
光束直径/mm	20		
线偏振度/%	>97%		
接收波长/nm	532,355-P,355-S,387(拉曼)		
荧光接收波长/nm	460		
光电探测器	紫外光电倍增管 PM - HV - 03@532, 355 - P,355 - S,387nm		
望远镜	共轴 Schmidt – cassegrainian 型望远镜		
直径/mm	300		
视场/mrad	2-3 可调		
总光学透过率	0. 20		
时间分辨率	最小10 s		
光电倍增管的量子效率	0. 2		

2.2 Mie 散射和荧光激光雷达方程

在单次散射条件下,弹性激光雷达方程可用方 程表示:

$$P(\lambda_L,z) = P_L \cdot \frac{A_0}{z^2} \cdot \xi(\lambda_L) \cdot \beta(\lambda_L,z) \cdot \xi(z)$$

$$\frac{c \cdot \tau_L}{2} \cdot T(z) \tag{1}$$

其中, P_L 是激光器的出光能量; $P_L = E_L/\tau_L$, A_0 为 接收面积; z 为距离; $\xi(\lambda_L)$ 为系统光学效率; $\beta(\lambda_L, z)$ 为体后向散射系数; $\xi(z)$ 为系统重叠系 数; c 为光速; τ_L 为脉宽; T(z) 为系统总的透过率; λ_L 为激光波长,接收系统噪声包括探测器和光学背 景噪声。

距离 z 处的系统透过率为:

$$T(z) = \exp\left[-2\int_{0}^{z} \alpha(\lambda_{L}, z) dz\right]$$
(2)

消光系数可由大气消光系数和战剂/气溶胶云 团消光系数组成。

$$\alpha(\lambda_L, z) = \alpha_{atm}(\lambda_L, z) + \alpha_c(\lambda_L, z)$$
(3)

与总消光系数一样,后向散射系数由大气后向 散射系数及云团消光系数组成,即:

$$\beta(\lambda_L, z) = \beta_{atm}(\lambda_L, z) + \beta_c(\lambda_L, z)$$
(4)

大气后向散射系数可由大气模式给出。对天然 气溶胶,消光散射比 $S_A = \alpha/\beta = 50$ 。

类似地,荧光激光雷达方程由下式给出:

$$P(\lambda, z) = P_L \cdot \frac{A_0}{z^2} \cdot K_0(\lambda_L) \cdot T(z) \cdot \xi(z) \cdot N(z) \cdot \frac{\sigma^F(\lambda_L) \cdot L^F(\lambda)}{4\pi} \cdot \frac{c_0 \cdot \tau_L}{2}$$
(5)

其中, $K_0(\lambda_L)$ 为包括光学效率的光学过滤函数; N(z) 为粒子数浓度; $\sigma^F(\lambda_L)$ 为荧光散射截面; $L^F(\lambda)$ 为物质的荧光指纹函数。

2.3 偏振激光雷达方程

根据式(1),偏振激光雷达探测大气和生物战剂/气溶胶时,在距离 z 处的后向散射回波功率的垂直分量和平行分量分别为:

$$P_{\perp}(z) = P_{L} \cdot \frac{A_{0}}{z^{2}} \cdot \xi(\lambda_{L}) \cdot \beta(\lambda_{L}, z) \cdot \xi(z) \cdot \frac{c_{0} \cdot \tau_{L}}{2} \cdot T(z) \cdot p_{\perp}(z)$$
(6)

$$P_{\parallel}(z) = P_L \cdot \frac{A_0}{z^2} \cdot \xi(\lambda_L) \cdot \beta(\lambda_L, z) \cdot \xi(z) \cdot$$

$$\frac{c_0 \cdot \tau_L}{2} \cdot T(z) \cdot p_{\parallel}(z) \tag{7}$$

式中, $p_{\perp}(z)$ 和 $p_{\parallel}(z)$ 分别为两个通道的系数常数, 依赖于各通道的探测器量子效率和光学接收效率, 故式(6) 除以式(7) 可得退偏振比为:

$$\delta(z) = \frac{P_{\perp}(z)/p_{\perp}(z)}{P_{\parallel}(z)/p_{\parallel}(z)} = \frac{P_{\perp}(z)}{P_{\parallel}(z)} \cdot \frac{p_{\parallel}(z)}{p_{\perp}(z)}$$
(8)

其中,
$$K = \frac{p_{\parallel}(z)}{p_{\perp}(z)}$$
可通过实验获得。

3 Mie 散射激光雷达的数据反演

对 Mie 激光雷达,一般采用 Fernald 法^[8]来反演 生物战剂/气溶胶云团的消光系数垂直分布,其后向 积分解和前向积分解分别为:

式中, $S = S_c/S_{atm}$, S_c 为生物战剂/气溶胶消光后向 散射比,其值随气溶胶浓度、尺度谱分布和化学成分 的变化而变化,一般为40~50 sr; S_{atm} 为大气分子的 消光后向散射比, $S_{atm} = 8\pi/3$; Z_c 为标定点高度,在 此高度上满足气溶胶散射比 $R(Z_c) = ((\beta_c(z_c) + \beta_{atm}(z_c)) = 1.01_{\circ})$

图 2 示出了 2014 年在合肥某地, Mie 散射激光 雷达紫外通道和可见光通道的外场时空观测结果, 观测时激光束和望远镜均垂直向上放置。由(a)和 (b)对比可知:①在相同视场条件下,若 355 nm 消 光通道的激光束能量足够强, 355 nm 通道的消光系 数较 532 nm 要大; ②355 nm 通道能观测到高度范围 1.7~2.9 km 处的气溶胶云团; ③在大气边界层底部, 355 nm 和 532 nm 通道的结果一致。





图 2 战剂/气溶胶时空分布图 Fig. 2 Time and space distributions of bioagents/bioaerosol 4 生物气溶胶激光雷达偏振测量与分析

图 3 示出了 2014 年 11 月 27 日凌晨至深夜在 某地,偏振激光雷达 355 nm 紫外通道的气溶胶退偏 振比和消光系数垂直观测的时空对比图,图 3(a)为 355 nm 通道的消光系数时空分布,图 3(b)为 355 nm 通道对应的退偏振比时空分布。



图 3 激光雷达的偏振时空测量分布 Fig. 3 Vertical and time distributions of extinction coefficient and linear depolarization ratio

从图可知:①在大气边界层内,27 日凌晨高度 约为0.5 km高的贴地层随时间逐渐减弱;②消光系 数也呈现出较为复杂的多层结构,说明在激光雷达 观测路径上气溶胶浓度分布随近地面风、湿度和气 压等其他条件影响较大;③退偏振比基本呈两层结 构,即近地层退偏振比相对均匀,高于近地层上,散 布着一些退偏振比较大的气溶胶云团或云点;④在 27 日凌晨 00:00~04:00 间,0.5 km 厚的近地层 内,退偏振比维持在0.01 左右的水平,说明在夜间, 在355 nm 波长上,气溶胶的球形形状保持得较好; ⑤在04:00后,退偏振比在近地层数值上有轻微的 上升,约为凌晨的2倍,其高度与气溶胶层的厚度一 致,上升至1.3~1.7 km。⑥在大气边界层上,在某 些高度上,仍存在着一些退偏振比数值达0.3的点 状气溶胶团,所以在部分测量时刻,其退偏振比垂直 廓线呈现出明显的不规则之字形,这主要是由于气 溶胶部分高度上,经凝结、聚合以及大气光化学反应 等过程,其形状产生了较大变化,不再是规则的球 形形。因而,总体上,除大气边界层以上的个别云 团退偏振比较高外,气溶胶退偏振比总体上维持 在较低的水平;在测量期间,气溶胶浓度呈现出明 显的时空变化;而表征其球形性的退偏比,在温 度、湿度、气压、风向及其他光生化条件的作用下, 除在贴地层较稳定外,在大气边界层以上的对流 层,变化明显。

表 2 列出了部分植物花粉,在 355 nm 波长上的 水平线退偏振比 δ_L。从表中数据可知,利用线退偏 振比数据,也可以对生物气溶胶和生物战剂进行初 步的分析和识别。尽管该结果受当时气象条件和观 测系统的影响,但利用退偏振比识别生物战剂/仍不 失为一个较好的解决方案。

表2 部分花粉的水平线退偏振比

Tab. 2 Linear depolarization ratio of some pollens

花粉类型	桑树	阿斯彭杨树	栎树	榆树	松树	豚草子	车前草
δ_L	0.14	0. 14	0. 08	0.07	0.13	0.16	0. 20

5 结 论

生物战剂/气溶胶的光学遥测和识别是当今 生化物和光学领域研究的热点之一。散射、荧光 和偏振信息是生物战剂/气溶胶时空观观测和识 别的有效数据源。本文对 Mie 散射、紫外激光诱 导荧光和退偏探测激光雷达的原理、数据反演等 进行了阐述和讨论,并对消光系数(与浓度相关)、 荧光和退偏振比的探测结果进行了探讨,结果表 明:①Mie 散射可以较好地反映出气溶胶的时空分 布,尤其是 355 nm 波长的测云能力在激光出射能 量相当时较 532 nm 强;②尽管受气溶胶内部物化 生性质和外部温度、湿度等条件的影响,退偏振比仍 是判定生物战剂气溶胶的有效手段。

参考文献:

- [1] Matoušek J, Bendík J, Linhart P. CBRN: biologické zbraně. (CBRN Boological weapons) [J]. Sdružení požárního a bezpe č nostního inženyrství, 2007. (in Czech).
- [2] Klietmann W F, Ruoff K. Bioterrorism: Implications for the clinical microbiologist [J]. Clinical Mikrobiology Reviews, 2001, 14(2), 364 - 381.
- Burger H A, Solomon W R. Sampling and analysis of biological aerosols [J]. Atmospheric Environment, 1987, 12 (2),451-456.

- [4] Holmberg B. Health Aspects of Chemical and Biological Weapons[M]. World Health Organization, 1970.
- [5] D RWalt, D R Franz. Biological warfare detection [J]. Analytical Cemistry, 2001, 72(33):738A - 746A.
- [6] G M Dougherty, D S Clague, R R Miles B. Field-capable biodetection devices for homeland security missions [C]// SPIE Opt. Photon. Global Homeland Security III, 2007, 6540:6540169.
- [7] P PHairston, J Ho, F R Quant B. Design of an instrument for real-time detection of bioaerosols using simultaneous measurement of particle aerodynamic size and intrinsic fluorescence[J]. Aerosol Sci., 1997,28:471-482.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. Appl. Opt., 1984;23:652-655.