

文章编号: 1001-3806(2008)03-0287-03

探测有机气溶胶荧光激光雷达的设计研究

邹炳芳¹, 张寅超², 胡顺星¹

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031; 2 北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 为了能够实现对大气中有机气溶胶颗粒的探测, 采用激光诱导荧光技术, 提出了适用于探测大气有机气溶胶颗粒的荧光激光雷达系统模型。对系统模型及探测原理进行了详细描述, 给出了荧光雷达系统参数, 并对系统的探测能力进行了模拟。结果表明, 该系统在夜间测量时, 在 5km 以下, 对有机颗粒的最小可探测浓度可达到几个颗粒/L; 对于白天测量, 由于太阳背景辐射的影响, 在 2km 以内有较高的灵敏度, 最小可探测浓度可达到 10 个颗粒/L, 基本上能够满足实际应用中有机气溶胶颗粒探测的要求。这对荧光雷达系统的搭建提供了有利的指导。

关键词: 大气与海洋光学; 激光雷达; 激光诱导荧光; 大气遥感; 有机气溶胶颗粒

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Study on the design of measuring organic aerosol fluorescence lidar

ZOU Bing-fang¹, ZHANG Yin-cao², HU Shun-xing¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to measure the organic aerosol in the atmosphere, based on laser induced fluorescence, a fluorescence lidar model system was put forward for detecting organic aerosol in the atmosphere. The principle of models system measurement was described exhaustively, system model parameters were presented after fully simulating and analyzing, accounting detection capability. The results showed that when the lidar worked at night, the least detectable density of organic aerosol was only a few particles/L within 5km; while during the daytime, the least detectable density could reduce to less than 10 particles/L within 2km due to background radiation. The results show that the lidar model can satisfy the requirement of real organic aerosol detecting, which could provide valuable instructions to the design of a real system.

Key words: atmospheric and ocean optics; lidar; laser induced fluorescence; atmospheric sensing; organic aerosol

引 言

激光诱导荧光遥感探测技术是现代光学分析技术的一个重要组成部分^[1], 将激光诱导荧光技术应用到激光雷达上, 形成有机气溶胶的紫外激光诱导荧光雷达探测技术, 利用该技术可以测量各种大气成分的数量、石油溢出物的数量以及测量海藻的生长情况等^[2], 1994 年美国研究出一台紫外荧光雷达系统, 系统采用波长为 266nm 单脉冲能量 235mJ 的 Nd:YAG 激光器, 可以实时监测波长为 266nm 的弹性散射光和波长为 300nm~400nm 的未经散射的荧光^[3]; 1999 年, 美国又研制了一种长距离传感探测系统, 可用它对正在运动中的气溶胶云团进行测距、探测和跟踪, 其跟踪高度可达 30km, 但是该系统无法识别气溶胶云团的

性质^[4]。

为了实现对有机气溶胶颗粒的遥感探测, 作者设计了基于激光诱导荧光原理荧光激光雷达系统模型, 对系统模型和探测原理进行了详细描述, 并对不同距离处荧光光谱信号强度和最小可探测浓度进行了模拟计算^[5], 二者计算结果一致, 证明该系统模型设计合理, 参数选择恰当, 对实际系统的搭建具有重要的指导意义。此外, 该系统与以往荧光激光雷达系统相比, 结构简单、成本低, 选用 Nd:YAG 的三倍频 355nm 波长作为激发光源, 其能量高, 大气衰减较 266nm 波长小, 激光器技术成熟, 更适合于民用化。

1 荧光激光雷达探测原理

所谓激光诱导荧光, 即介质受到激光激发后, 处于激发态上最低能级的分子在下降到基态的过程中, 以光量子的形式释放出它所吸收的能量, 这就是荧光^[6]。在荧光的发射过程中, 因受激分子在跃迁时损失了一部分能量, 所以荧光总比激光波长要长一些。

作者简介: 邹炳芳 (1981-), 女, 硕士, 主要研究方向为激光雷达及其应用。

E-mail: bzfou@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-04-26

有机颗粒中主要含有氨基酸、辅酶、核黄素等多种有机分子,其荧光光谱如图1所示,主要分布在300nm~

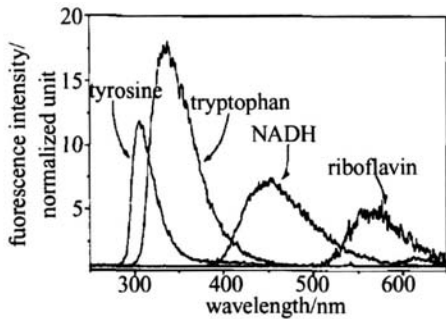


Fig 1 Single particle 266nm excited fluorescence spectra of common fluorophores found in organic aerosol particles

600nm之间^[7],而大气环境中的主要颗粒是无机气溶胶粒子,这就要求能够从无机气溶胶粒子中探测出较低浓度的有机气溶胶粒子。由于紫外光激发无机气溶胶粒子产生的荧光强度非常弱,与有机颗粒相比,无机气溶胶粒子在300nm~600nm区间几乎没有荧光,因此对于等质量的粒子,未经分光的全部荧光强度足以将有机粒子与其它普通的无机气溶胶粒子区分开来。

荧光激光雷达是根据大气中有机气溶胶颗粒能够在激光的激发下产生的荧光的原理来实现探测有机气溶胶的目的。为了减小系统测量误差,以大气中含量稳定的氮气的喇曼散射回波作为参考信号^[8-10],则所测有机气溶胶浓度为:

$$N = \frac{N_{N_2} T(\lambda_R, z) \frac{d\sigma_{N_2}(\lambda_0)}{d\Omega}}{T(\lambda_c, z) \frac{\Psi \sigma_f(\lambda_c)}{4\pi} \int_{\lambda_c - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{2}} I(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{N_r(z)}{N_{N_2}(z)} \quad (1)$$

式中, N 为待测有机气溶胶颗粒的浓度, $N_{N_2}(z)$ 为 N_2 的喇曼信号光子数; $N_r(z)$ 为大气中有机气溶胶颗粒的荧光信号光子数; λ_c 和 λ_R 分别为荧光光谱的中心波长和 N_2 分子的喇曼散射波长; $T(\lambda_R, z)$ 和 $T(\lambda_c, z)$ 分别为波长 λ_R 和 λ_c 所对应的大气透过率; $d\sigma_{N_2}(\lambda_0)/d\Omega$ 为 N_2 分子在波长 λ_0 激发下的微分散射截面; $\sigma_f(\lambda_c)$ 为有机气溶胶颗粒在 λ_c 处的荧光截面; Ψ 为激发波长 λ_0 处有机气溶胶粒子的荧光量子效率; $I(\lambda)$ 为归一化的荧光光谱线型函数。

2 荧光雷达系统模型设计

该荧光雷达系统模型可以实现两个功能,首先通过接收波长为1064nm的大气后向散射信号确定是否有气溶胶云团的存在,同时获得有关气溶胶颗粒大小、距离及云团厚度方面的信息。其次是对气溶胶云团的性质进行辨别,一旦确定有气溶胶云团的出现,系统将触发波长为355nm的紫外光源,对气溶胶云团进行激发产生荧光,通过对回波信号进行分析作出是否含有

有机颗粒的判断,及时发出预警。

图2为探测有机气溶胶荧光激光雷达系统模型的示意图,其中激发光源为Nd:YAG激光器发出的

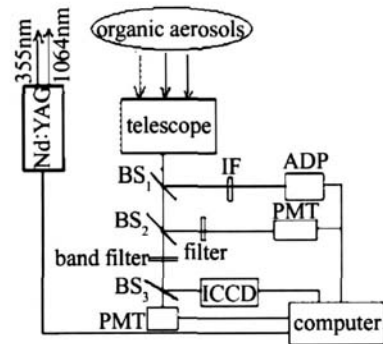


Fig 2 Schematic of the fluorescence lidar

1064nm基频光和经BBO晶体三倍频后得到的355nm的倍频光(激光脉冲频率为20Hz),由有机颗粒的荧光光谱看似Nd:YAG激光器的四倍频266nm激发的荧光强度更大,但考虑到大气中臭氧分子的强烈吸收使其能量消耗很大,且单脉冲能量较低,故选择Nd:YAG激光器的三倍频光355nm作为激发光源。为了减小盲区 and 过渡区,系统采用发射和接收同轴结构。同时采用12倍扩束镜进行扩束以减小发散角。接收系统包括接收望远镜和后继光学单元。接收望远镜是卡塞格林望远镜,主镜为抛物面。由于大气中有机颗粒的荧光散射信号极其微弱,应尽量采用大口径接收望远镜来提高其探测能力,综合考虑性价比后选用30cm望远镜,焦平面处安装小孔光阑,通过更换不同孔径的小孔光阑,可以使望远镜的接收视场角在一定范围内可变,小的视场角可以减少不必要的背景辐射。后继光学单元中插入各种光学元件用以分束:由分束镜(beam splitter, BS)1反射的辐射光通过干涉滤光片获得1064nm的后向散射光,由雪崩光电二极管(avalanche photodiodes, APD)接收,当其光强超过设定阈值时,表明有气溶胶云团出现,通过反演计算可以得到有关云团距离、大小以及云团厚度的信息,一旦探测到有气溶胶云团出现立刻触发355nm的紫外光对云团性质进行识别,此时后向散射光经分束镜2反射后由窄带滤光片获得 N_2 的喇曼散射信号,最后被光电倍增管(photo multiplier tube, PMT)接收,透过分束镜2的光由一个带通滤光片将400nm~500nm波段的光(该波段包括了大部分的有机荧光)分离出来,经过分束镜3后其中90%的光经光谱仪分光后被像增强型电荷耦合器(intensified charge coupled device, ICCD)接收获得荧光光谱信号,10%的光直接被PMT接收。后继检测单元前置放大器和光子计数器图中未标出。荧光激光雷达所接收的外来辐射噪声主要为天空背景辐射所引

起的噪声,若在夜间探测,这部分辐射噪声便可忽略。

3 系统探测能力估算

为了对系统模型的探测能力有一个初步的确定,同时也为了更好地指导实际系统的搭建,分别对系统在不同距离处的荧光信号强度和最小可探测浓度进行了模拟计算。荧光激光雷达接收信号模拟计算参数如表 1 所示。

Table 1 Parameters of numerical simulation of fluorescence lidar

parameter	reference value	parameter	reference value
laser energy of per pulse (355 nm)	100mJ	number of laser pulses	6000
quantum efficiency of FMT	22%	efficiency of collecting optics	12%
background radiation	MODTRAN	width of filter	80nm
field of view of collecting optics	1.0 mrad	quantum efficiency of NADH	0.1
diameter of telescope	300mm	average fluorescent area of organic aerosol	$5 \times 10^{-12} \text{m}^2$

3.1 不同距离处荧光光谱信号强度

在使用雷达系统进行探测时,由大气太阳辐射多次散射以及 FMT 的暗电流引起的噪声信号也与荧光信号一起被系统探测到。由基本的辐射理论得到背景辐射的数学表达式为^[11]:

$$N_b = \frac{\eta \lambda_c}{hc} P_b \pi \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \Delta \lambda_r A_0 t(\lambda_c) \Delta t \quad (2)$$

式中, N_b 为接收到的背景辐射光子数, P_b 为白天的光谱辐射率, θ 为接收视场角, η 是光电倍增管量子效应, h 为普朗克常量, A_0 为接收望远镜面积, $\Delta \lambda_r$ 为滤光片的带宽, Δt 为探测时间, c 为光速。可以看出,背景辐射与被测大气的距离无关。探测器的暗电流噪声表示为: $N_d = n_d \cdot \Delta t$, 其中, n_d 是探测器的暗计数。

根据表 1 中所选用参数对不同距离处的荧光光谱信号进行了数值模拟计算,计算结果如图 3 所示。

从图 3 中可以很容易看出,系统模型在白天探测时,在 1km~2km 距离内,荧光信号较强,太阳背景辐射相对较弱,可以很容易的探测出荧光信号,然而在 3km 以后,荧光信号几乎被噪声所淹没,信噪比较差。对于夜晚探测,由于夜晚星光背景噪声较弱,几乎可以忽略不计,因此,夜晚探测时的探测距离相对白天有明显的提高,在 5km 以内都有较好的信噪比。

3.2 最小探测浓度估算

为了进一步了解系统的探测性能,对系统的最小

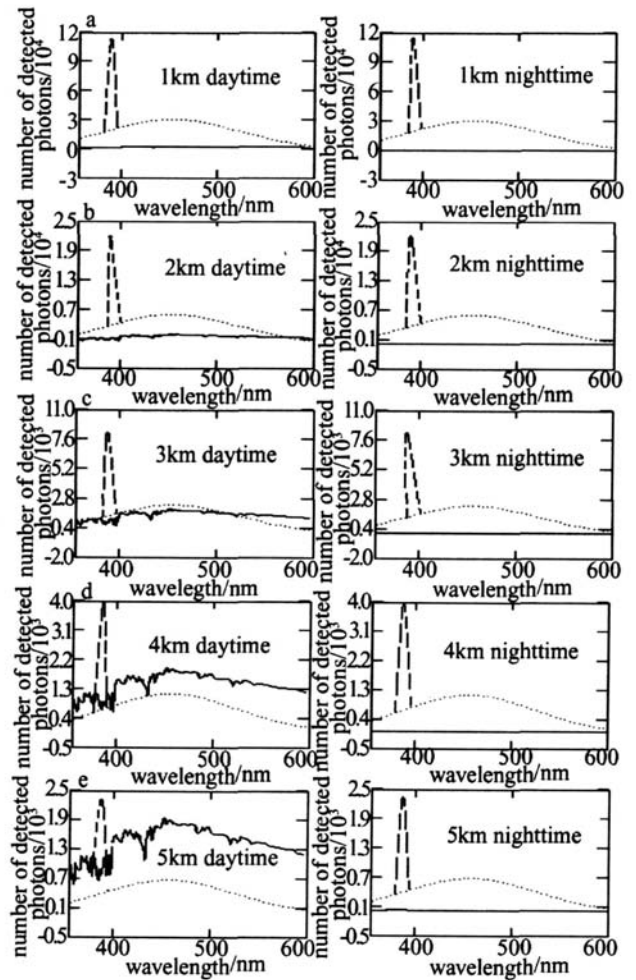


Fig 3 Simulated spectral profiles expected from organic aerosol clouds for day and night scenarios, these include the organic aerosol fluorescence (dot line), the Raman signals of nitrogen (dash line) and the noisy profiles from MODTRAN (solid line)

探测浓度进行了数值模拟计算,取最小信噪比为 10,其它参数与模拟计算光谱信号强度时所选用的参数相同,通过计算获得白天和夜晚探测时不同距离处的最小可探测浓度,得出其与距离的关系。如图 4 所示,其

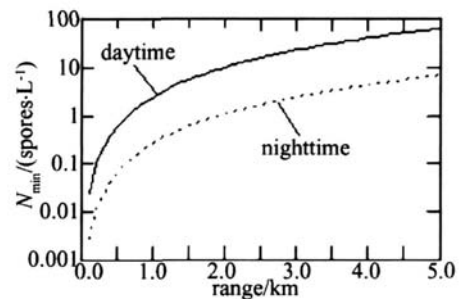


Fig 4 Minimum detectable BG concentration vs range

中虚线为夜晚最小探测阈值,实线为白天最小探测阈值。可以看出,在背景噪声可以忽略的夜晚该系统具有较高的灵敏度,在 5km 处该系统的探测精度可以达到几个颗粒/L;在具有较强背景辐射的白天,系统在

(下转第 292 页)

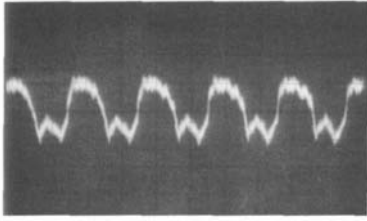


Fig 5 Photoelectric detection of underwater acoustic signal at 100Hz

3 结束语

从以上分析可见,利用光线分析法,可以精确的描述出在光电探测系统接收端处理的光通量随被测信号信息的频率呈周期性变化的情况,并且通过实验验证了这种情况。可见,光线分析法为水下声信号光电探测系统的进一步仿真分析开辟了一个可行的途径,为水下声信号光电探测技术^[9]的进一步分析打下了基础。

由于现有的实验条件以及接收机频响的限制等原因,高频信号的检测效果还不理想,在实验中还存在一些问题,比如实验过程中存在较大的系统噪声、背景噪声;实验是在比较理想的条件下进行的,距离实际应用还有一定的难度;外差检测技术在具体的应用上还存在一定的瓶颈等等,所有这些问题都有待继续研究改进。

(上接第 289页)

2km 以内也有较好的探测灵敏度,在 2km 处可以探测到 10 个颗粒/L,基本上能够满足实际应用的需要。

4 结论

通过模拟计算从理论上分析和讨论了所设计的荧光激光雷达系统模型对有机气溶胶的探测能力,并分析了各个系统参数对系统探测能力的影响,结合实际情况选取了较为合适的系统参数,并根据选定的系统参数对不同距离处探测到的荧光光谱信号强度以及荧光激光雷达系统在白天和晚上的探测阈值进行了估算。结果表明,该系统能够实现对有机气溶胶颗粒的实时探测,并具有较高精度,对下一步实际系统的搭建具有较强的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] LIU J, ZHANG Y, LI J Zh, *et al* Relationship between intensity of laser induced fluorescence and oil temperature [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000, 20 (5): 636-638 (in Chinese).
- [2] WANG Zh Y, WANG D M. A study of laser identification on bioaerosols [J]. Optoelectronic Technology and Information, 1998, 11 (4): 1-6 (in Chinese).
- [3] CHRISTENSEN S D, MERROW C N, DESHAM S. UV fluorescence

参 考 文 献

- [1] LEE M S, BOURGEOIS B S A laser sensing scheme for detection of under water acoustic signals [C]//Conference Proceedings 1998 IEEE South Knoxville USA, Tennessee, Knoxville: IEEE, 1998: 253-257.
- [2] LIR F, CUI GH, TAN Z X, *et al* Laser-acoustic remote sensing technique [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003: 3-11, 163-191 (in Chinese).
- [3] DAI Zh H, SUN J Z, SU I P F. Unidimensional model fundamental research of the water surface crosswise microwave [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2003, 16 (1): 23-28 (in Chinese).
- [4] YAN X G, PENG F Y, XU G H, *et al* Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel [J]. Laser Technology, 2005, 29 (3): 266-269 (in Chinese).
- [5] YI H H, SUN J Z. The fundamental research of survey submarine sound field with laser [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2003, 16 (4): 252-255 (in Chinese).
- [6] SANG GM, TAN Z X, HE J L. Applied research of laser technology in tapping acoustic signal detection [J]. Ship Electronic Engineering, 1999 (6): 56-59 (in Chinese).
- [7] CHEN G X, QIN Y W. Optical communication techniques and application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 52-56 (in Chinese).
- [8] ZHOU Ch B, LU K H, JANG R X, *et al* Study on experimental method for underwater acoustic field detection from water surface using laser probe [J]. SPIE, 1998, 3668: 515-521.
- [9] CUI GH, LIR F, YUN TH, *et al* A laser remote sensing study for detection of underwater acoustic signals [J]. Ship Science and Technology, 2002 (1): 46-50.
- [10] lidar detection of bioaerosols [J]. Proc SPIE, 1994, 2222: 228-237.
- [4] ZHONG Zh Q, ZHOU J, SUN D S. The research of error analysis and simulation of aerosol detected by MPL [J]. Laser Technology, 2006, 30 (3): 232-234 (in Chinese).
- [5] CONDATORE L A, GUTHRIE R B, BRADSHAW B J, *et al* U. S. army soldier and biological chemical command counter proliferation long range-biological standoff detection system (CP LR- BSDS) [J]. Proc SPIE, 1999, 3707: 188-196.
- [6] SMITH K C. The science of photobiology [M]. Beijing: Science Press, 1984: 55-61 (in Chinese).
- [7] SNAPRAKASAM V, HUSTON A L, SCOTTO C, *et al* Multiple UV wavelength excitation and fluorescence of bioaerosols [J]. Optics Express, 2004, 12 (19): 4457-4466.
- [8] MEASURES R M. Laser remote sensing: fundamentals and applications [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1984: 237-256.
- [9] HONG G L, ZHANG Y Ch, ZHAO Y F. Raman lidar for profiling atmospheric CO₂ [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55 (2): 983-987 (in Chinese).
- [10] YANG Zh, LI Q, SUN D S. Study about a atmosphere extinction coefficient based on 1064nm Mie scattering lidar [J]. Laser Technology, 2006, 30 (2): 170-173 (in Chinese).
- [11] NAKAJIMA T Y, MAI T, UCHINO O, *et al* Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by space borne elastic scattering lidar [J]. Appl Opt, 1999, 38 (24/20): 5219-5220.