

# 激光荧光雷达系统的测量方法与应用

刘南英 荀毓龙 吴文洲 孙修洪

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

## 摘 要

本文叙述了应用激光荧光雷达系统测量海上溢油类别以及植被、岩矿、土壤、地被物等荧光光谱的方法与技术。该装置由  $N_2$  激光源、OSA 光学光谱分析仪、卡斯格伦望远镜接收系统三部分组成。该装置可在室内,也可在室外 25—60m 远处测量各种物质的受激发射荧光。该仪器用标准灯谱进行了校正。

**关键词** 激光荧光雷达系统 遥感

## 一、前 言

激光荧光遥感系统是近10多年发展较快的有源遥感系统之一,海洋国家(美国、加拿大、日本、西德、英国、苏联)相继开展了研究。主要目的是进行海洋环境污染监测,同时研究其在海洋物理参数测量、海洋初级生产力调查与开发等方面应用的可行性<sup>[1-4]</sup>。

中国科学院安徽光学精密机械研究所是国内唯一开展激光荧光雷达系统工程化研究的单位,1982年开始研究,1985年正式成立课题组。激光荧光遥感除应用于海洋物理领域外,在其它许多领域也有着诱人的应用前景。例如,用于陆地表面岩石与植被研究,进行植被分类,监测植被生长、农作物长势以及病虫害影响等。还可用于油气资源探测、大气环境监测以及军事目标与背景的探测等研究。自我们建立激光荧光雷达系统以来,从事了这方面的一系列研究,1988年6月和1989年9月曾先后两次到青岛胶州湾海域进行船载实地测量海上溢油模拟实验,成功地利用荧光峰值波长对5种油(70\*汽油、煤油、0\*柴油、齿轮油和14\*润滑油)进行了分类比较。并在25m和60m远处测量了国内油田的原油(如大庆原油、胜利原油、辽河原油以及仪征混合油样品)。同时又与中国科学院南京土壤研究所合作,测量了植被、土壤、各种缺素状态及不同生长季节的农作物以及岩石矿物、化合物、人工物目标的荧光光谱,并进行了荧光特性的分析研究,获得了一批有应用价值的数据库。

## 二、测量方法与技术以及光谱修正

激光荧光雷达系统装置建于 1985 年底,图 1 为实验系统的结构图。该系统由 N<sub>2</sub> 激光器、光学光谱分析仪 OSA 和高压脉冲驱动器组成。高压脉冲驱动器(即闸门)的用途是产生控制各部件协调工作的同步信号。工作时闸门同步输出一个 5 V 的脉冲信号,触发激

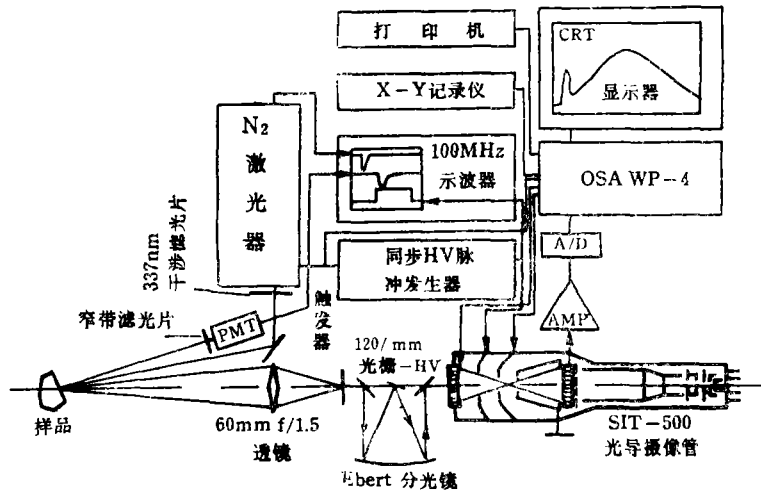


图 1 实验激光荧光雷达系统框图

Fig. 1 Diagram of laser fluorescencing radar system

光器,同时驱动 OSA 主机的信号累加工作,经过一个短暂的延迟后,闸门高压端输出一个高压信号( $1 \times 10^4$ V 负高压),打开 OSA 摄像机前的电子快门。经触发后的 N<sub>2</sub> 激光器,输出 1—5mJ 的 337nm 激光脉冲,照射到被测物目标上,目标物被激光诱导所激发的荧光回波信号经卡斯格伦望远镜汇聚于单色仪狭缝上,荧光回波信号经单色仪分光后成像于 OSA 摄像头的光纤板上。处于闸门状态下的 OSA 摄像机,经高压驱动器输出的高压触发信号将摄像机的电子快门打开。选择恰当的高压信号的延迟时间(相对于触发激光器的脉冲信号)和宽度,使门信号套住荧光回波信号,则荧光信号产生的光电子可到达硅靶上。门信号消失后,摄像机关闭,这样摄像机输出的视频信号,经前置放大进入 WP<sub>4</sub> 主机,为 OSA 光谱仪记录,从而获得荧光光谱。由主机处理后的光谱图形,可显示于监视器上,或存于磁盘上。为使仪器各部件协调地同步工作,则需调整系统,使控制各部件协调工作的驱动信号满足图 2 的关系。采用这种闸门技术可以减少背景影响,大大提高信噪比,使系统能够适用于全天时野外目标测量。

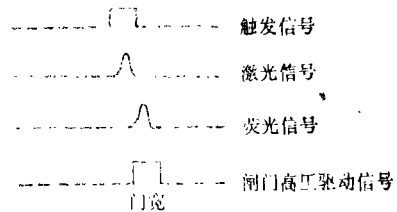


图 2 各信号时序

Fig. 2 Time sequence of signals

该系统考虑了抗光电干扰问题,使得 OSA 等可在强干扰环境下工作;还采取了距离选通及闸门宽度控制技术,使仪器可在白天阳光背景下工作。这对实用化是极为重要的。

根据系统的参数来估计其探测性能,对 25m 距离上信噪比的分析表明,本系统在 20 次累加平均测量条件下,信噪比为 3 时,探测距离可达 100m。但当系统光学及电学匹配良好时,其探测距离可增大一个量级。如用新的准分子激光器,脉冲能量比氮分子激光器高至少一个量级,估计探测距离可达 3 000m (以每秒采样 20 次平均)。如顾及到各种因素,并要求信噪比较高 (>10) 时,则在数百米的距离上进行实际工作,是完全可行的。

本系统可用于室内外各种地物的荧光光谱测量。在室内测量时,包括弱荧光样品,因距离较近,光路容易调节,一般可得到较准确的荧光光谱信号。可随时测量新鲜活体植被、岩矿和土壤样品,只要将样品放置在样品台的固定位置上即可。

在室外,分别在 25m 和 60m 远处,建有样品台。这两者相比,探测距离远的,接收到的信号要减弱,且光谱分布也略有不同。这一方面是由于发射距离远,光束准直系统不理想,激发能量减弱;另一方面是由于大气对荧光的吸收,使得信噪比降低所引起的。所以,室外测量时,要将发射系统与接收系统调至同轴是至关重要的。至于样品的制备与测试的具体要求,将视不同样品而异。这些由有关文章分别予以论述,本文不一一赘述。

无论在室内、室外,还是野外测量,都不可避免地存在实验噪声。它主要来自于背景光和系统本身。背景噪声为系统在接收荧光信号的同时,不可避免地接收的太阳背景的散射信号。尽管在探测器上加了闸门,大大提高了信噪比,但由于氮分子激光器为球隙触发,从触发信号输入到出光时间的频率稳定度不高,为使探测器始终能接收到荧光,闸门开放时间很短,为 6 $\mu$ s,而一般油膜、植被的荧光寿命仅 10ns 左右,这无疑增加了背景的门积分时间,从而引起噪声增强,使所测光谱有所失真。

系统本身的噪声主要来自摄像管噪声和前置放大器的电子噪声。前置放大器噪声是一种宽带电子噪声,在摄像管输出信号较大时可忽略不计。摄像管噪声很复杂,包括光、电、热以及机械振动引起的噪声,如光子、光电子、二次电子发射起伏造成的散粒噪声等。其中占主导地位的是暗电流噪声。硅靶摄像管的暗电流是靶压和靶面温度的函数。靶压升高,暗电流加大;温度每下降 25 $^{\circ}$ C,暗电流则以 10 倍的因子减小。

试验中为了扣除背景和由暗电流引起的各种噪声信号,采取了减背景措施,即在无荧光信号和有荧光信号条件下,作两次测量,把结果相减,就可得到扣除背景的信号光谱。

$$S_1 = F_{i,b} - F_b \quad (1)$$

$F_b$  是测量背景加暗电流谱,  $F_{i,b}$  为  $F_b$  加信号的荧光谱。背景噪声较稳定时, (1) 式可除去此噪声的影响。而暗电流噪声是一种随机噪声,存在较大的起落, (1) 式不可能完全消除它。

$$S_1 = S_o + \Delta F_b \quad (2)$$

$S_o$  是荧光谱的真实值,  $\Delta F_b$  是随机的暗电流噪声。随机暗电流噪声等引起系统所测光谱失真的原因有: (1) OSA 探测器波长响应的不均匀性 SIT( $\lambda$ ); (2) 靶面灵敏度的不均匀性 B(ch); (3) 光学系统的响应畸变,扫描几何失真 OPT( $\lambda \cdot ch$ )。

这些因素只用简单的减背景方法是难以消除的,因而我们采用标准灯对光谱进行修正。基于以上分析,系统的总畸变可分解为: SIT( $\lambda$ ), B(ch) 和 OPT( $\lambda \cdot ch$ ), 畸变函数为:

$$E(\lambda \cdot ch) = SIT(\lambda) \cdot B(ch) \cdot OPT(\lambda \cdot ch)$$

设  $S_0$  为校正后的被测样品光谱,  $S_3$  为国家计量局给出的溴钨灯标准谱数据。则

$$S_1(\lambda \cdot ch) = E_1(\lambda \cdot ch) \cdot S_0(\lambda)$$

$$S_2(\lambda \cdot ch) = E_2(\lambda \cdot ch) \cdot S_3(\lambda)$$

如果两次实验条件一样, 则  $E_1(\lambda \cdot ch) = E_2(\lambda \cdot ch)$ 。则

$$\frac{S_1(\lambda \cdot ch)}{S_0(\lambda)} = \frac{S_2(\lambda \cdot ch)}{S_3(\lambda)}$$

$$S_0(\lambda) = \frac{S_1(\lambda \cdot ch)}{S_2(\lambda \cdot ch)} \cdot S_3(\lambda)$$

从而获得校正后的被测样品光谱  $S_0$ 。式中  $S_1(\lambda \cdot ch)$  为 OSA 所测样品光谱,  $S_2(\lambda \cdot ch)$  为 OSA 所测溴钨灯光谱。图 3 所示为溴钨灯的已知发射曲线及 OSA 系统对溴钨灯的响应曲线。由此可算出修正因子, 并以此来修正荧光光谱<sup>[6]</sup>。图中光谱分布强度均以相对荧光强度为单位。相对荧光强度是用任意单位表示的荧光强度实测值。只要保证激光器、探测物和接收器之间有一固定的关系, 就能正确利用相对强度单位。

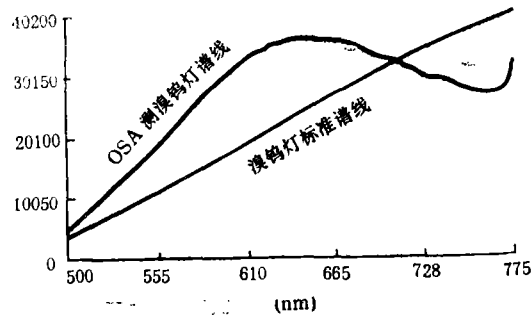


图 3 溴钨灯的已知发射曲线及 OSA 系统对溴钨灯的响应曲线

Fig.3 Known emission curve of the bromide-tungsten lamp and responding curve of OSA system to the bromide-tungsten lamp

### 三、系统的应用实验结果和讨论

通过几年的实验研究, 系统基本上排除了光电干扰, 能在白天和晚上以雷达方式对远至 60m 距离上的样品进行激光荧光光谱测量, 可从光谱的峰值波长、重心波长上区分国内主要原油、重油和轻油。同时, 还利用激光荧光技术测量了一些植被, 如水稻、小麦、玉米和棉花等农作物的荧光特性。这些特性包括受环境因素(如干旱, 缺乏养分)影响后的生长状况, 以及识别植被类型。

实验研究证明, 利用激光诱导荧光的强度和光谱特性来判断植物的受害状况和识别植物的种类是有效的。所有的光谱数据都是利用脉冲氮分子激光器在室内或在 25m 远处的试验台上测量获取的。我们的研究表明, 旱灾和缺乏养分会改变农作物的正常的激光诱导荧光光谱。探测植物的营养状况和旱情可了解农作物随环境条件因素(包括旱灾和缺乏养分以及虫和细菌的侵害)的变化, 对这些因素引起的农作物损害的早期探测, 可使之在造成严重危害之前采取补救措施, 或者把农作物的受害情况存档以供下一年参考。对作物缺素的实验, 可使我们从经济核算的角度利用激光诱导荧光技术来选择有利于植物最佳生长的肥料浓度和配比(有关这方面的详细情况可参看本期增刊的其它文

岩矿自然表面的激光荧光光谱测量结果表明,大多数岩石及其蚀变物有明显的荧光特征,特别是重金属矿,它的荧光强度大于油膜的荧光强度。被研究过的岩矿样品有红

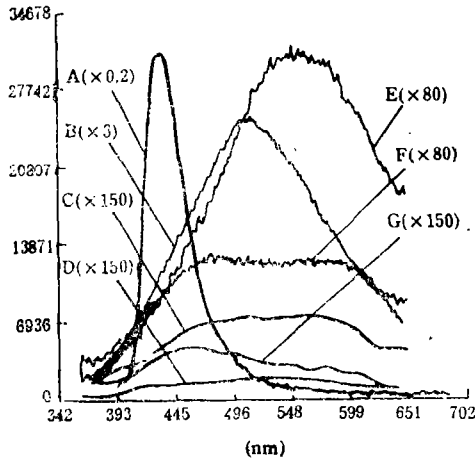


图 4 激光诱导岩矿荧光光谱曲线

Fig. 4 Laser induced fluorescence spectra of rocks and minerals

A—萤石 (fluorite) B—滑石 (talcum), C—黄铁矿 (pyrite), D—孔雀石 (malachite), E—雄黄 (realgar) F—雌黄 (orpiment), G—黄铜矿 (chalcopyrite)

柱石、红碧玉、电气石、混合片麻岩、黄铜矿、黄铁矿、萤石 (白绿两种)、雄黄、雌黄、硅灰石、硅藻土、磷灰石、蚀变辉岩、橄榄石、辉闪岩、孔雀石、花岗岩和硬锰矿。其中萤石的荧光最强,其次为硅灰石、电气石和雄黄,最弱为孔雀石<sup>[6]</sup>。图 4 为部分岩矿的光谱图。

在研究海洋污染监测方面,1988年6月和1989年9月两次到青岛胶州湾及其近海进行船载测量实验。最远探测距离24m,分别在白天和黑夜、停泊与行驶状态下进行了海上溢油的激光荧光测量。1988年共测石油样品6种,测得的荧光光谱与室内获得的基本一致(图5)。根据回波信号特征与已存储的样品

雷达回波比较,可以成功地区分大多数的油类,特别明显可分的是机油、柴油、润滑油和齿轮油。试验表明,在一定的太阳高度时,海面的阳光闪烁会使系统无法进行测量。船在开动时,海浪会影响油的大范围成膜,油膜厚度的测量就比较困难。当探测距离增大或在空中遥测油膜厚度时则会好些。

为了进一步验证该系统在实地工作的可重复性和稳定性,1989年9月在青岛胶州湾再次进行海上实地的测量实验。克服了1988年实验中光程过短致使激光荧光光程无法同轴的缺点,提高了探测灵敏度。另外还对胶州湾海域几个不同点的海水水色进行了测量。获得的资料已提供给国家海洋局青岛第一海洋研究所使用。

系统经合肥至青岛往返汽车运输(行程2000km)和船载实验(海监19号船800t级,二级海况)表明,系统可以在震动、颠簸条件下测量海上溢油膜的荧光,结果与室内测量一致(见图5)。海上实验的成功不仅验证了系统用于海上溢油膜测量的可行性,同时也为本系统的进一步实用化积累了第一手资料。

通过研究,对激光荧光遥感的可行性及应用发展前景有了较为明确的认识。作为一项先导性高新技术的主动遥感手段,在技术上,依据目前国内的科学技术水平和条件,可以基本解决。在方法上,理论和研究已证明不仅对于海洋溢油污染、岩石矿物荧光特性的测量分析有用,而且对植被、土壤种类的识别,营养状况、旱情状况及病虫害的监测也是一种有效的方法。

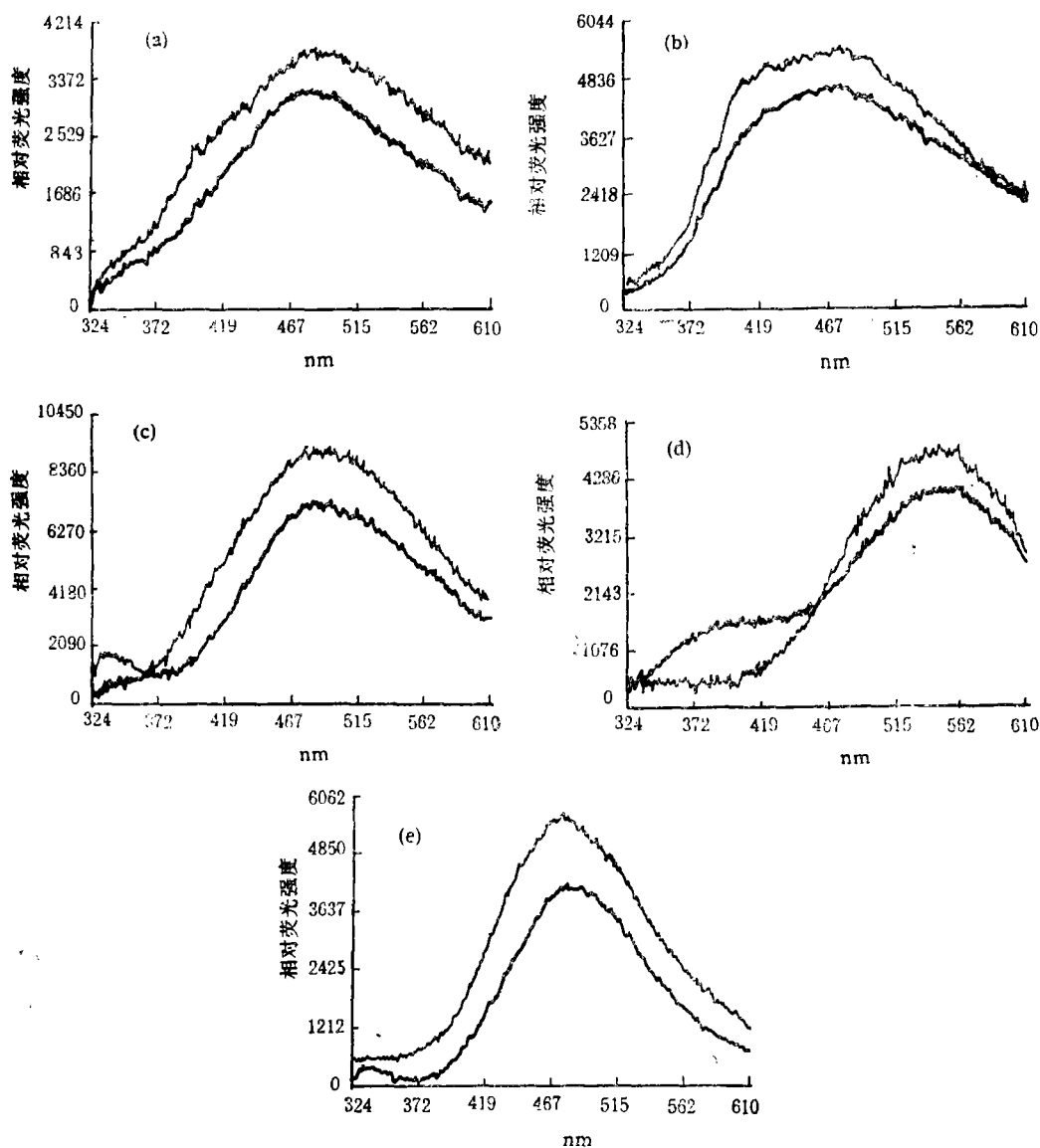


图 5 实地与实验室测量的荧光光谱的比较

Fig. 5 Comparison of fluorescence spectra measured in laboratories and fields

- (a) 70#汽油 (70#gasoline), (b) 煤油 (kerosene), (c) 0#柴油 (0#diesel oil),  
 (d) 齿轮油 (gear oil), (e) 14#润滑油 (14#lubricating oil)  
 ——在实验室测量的谱 (spectra measured in laboratories)  
 - - -在实地测量的谱 (spectra measured in fields)

## 参 考 文 献

- [1] Hoge, F. E., et al., Water Depth Measurement Using an Airborne Pulsed Neon Laser System, *Appl. Opt.*, 1980, Vol.19, No.6, 871—883.
- [2] Bijunas, L.B., et al., Oil Spill Detection and Identification Using a Laser Fluorosensor, *Remote Sensing for the Control of Marine Pollution*, Edited by Jean-Marie Massin, Plenum Press, New York, 1984, 299—312.
- [3] O'Neil, R.A., et al., Field Performance of a Laser Fluorosensor for the Detection of Oil Spills, *Appl. Opt.*, 1980, Vol.19, No.6 863—870.
- [4] Saeo, T. et al., Laser Radar for Remote Detection of Oil Spills, *Appl. Opt.*, 1978, Vol. 17, No. 23, 3798—3803.
- [5] Chappelle, E.W. 等 (王河新等译), 植物的激光诱导荧光 (LIF), *国外激光进展*, (1), 1986.
- [6] Sun, X., et al., Sensing of Minerals and Rocks from a Distance Using a Laser Fluorosensor, *Proceedings ICOESE' 90* 365—367.

## Measuring Methods and Application of Laser Fluorescing Lidar System

Liu Nanying Xun Yunlong Wu Wenzhou Sun Xiuhong

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

### Abstract

The paper described methods and technology using laser fluorescing lidar system to detect fluorescence spectra of oil-film types, vegetations, rocks, minerals, soils and other terrain features. The installation is composed of a N<sub>2</sub> laser source, an optical spectrum analyser (OSA), Cassegrain telescope receiving system. The installation can be applied to measure fluorescence spectra of various substances in laboratories or in fields at the distances of 25—60 meters, the system is calibrated with standard lamp spectrum.

**Key words** Laser fluorescing lidar system Remote sensing