

研究简报

多通道海洋激光雷达溢油监测系统高台实验分析

李晓龙, 赵朝方, 齐敏璐, 马佑军, 李志刚, 刘智深

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003)

摘要: 系统介绍多通道海洋激光雷达溢油监测系统的硬件结构和高台实验,探讨多通道激光雷达探测溢油的可行性;此系统采用355 nm波长的3倍频Nd:YAG激光作为激发源,利用125 m高的实验平台,在白天和夜晚2种环境下进行实验,获得多种目标的雷达信号,并提取不同目标的特征荧光光谱,分析结果与实际情况相符。实验证明多通道海洋激光雷达溢油监测系统性能可靠,可以有效地进行溢油探测。

关键词: 多通道海洋激光雷达; 受激荧光; 溢油; 荧光光谱; 拉曼信号

中图分类号: P715.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2010)08-145-06

石油产品在现代社会发展和科技进步中发挥着重要作用。海洋既拥有丰富的石油资源,又是石油运输的重要通道,因此海洋面临的石油污染问题相当严重。海洋溢油污染对生态环境、人类健康以及经济发展具有严重影响,其监测和治理问题受到世界各国及有关部门的极大关注,能否快速、有效地处理海面石油污染事件成为国内外科学家致力解决的重大科学问题。

机载海洋激光雷达是目前监测海面溢油污染和探测海洋石油资源的重要手段。与传统探测技术相比,具有高效、实时、全天时工作等优点,是大面积海洋环境调查、探测最具有前景的技术之一。早在20世纪70年代,加拿大科学家 Measures^[1]和美国科学家 Fantasia^[2]等人就分别提出,可以利用测量海水荧光光谱的方法来鉴别海面油污染。目前国际上比较成熟的海洋激光雷达溢油监测系统有美国的 NASA 和 NOAA 联合研制的 AOL 系统、加拿大环境技术中心的 SLEAF 系统和德国 Oldenburg 大学的机载激光荧光仪^[3]。中国海洋大学海洋遥感研究所自国家七五攻关就致力于海洋激光雷达的研制,至今已经成功研制了多套海洋激光雷达系统^[4]。本文针对目前正在研究的机载多通道激光雷达海面油污染监测技术,介绍多通道海洋激光雷达溢油监测系统的组成结构,并在进行了大量(实验室实验的基础上,在机载实验进行之前,以高层建筑为实验平台,开展多通道海洋激光雷达溢油监测系统的远距离目标探测实验,检验雷达系统在高台实验条件下的工作性能。

此次实验目的解决该研制系统的有效进行目标探测、目标信号分析和长时间实时工作等关键问题。高

台实验于2009年8月27~29日在青岛沿岸进行,获得多种目标的雷达信号数据,提取相应的特征荧光光谱。实验数据分析表明该系统具有良好的雷达目标量和识别能力,为机载实验系统的研制奠定技术基础。

1 多通道海洋激光雷达溢油监测系统结构

多通道海洋激光雷达溢油监测系统(Multi-channel Oceanographic Lidar Remote Sensing of Oil Spill (MOLRSOS))主要由同轴发射与接收系统、分光与光电转换系统和信号采集、储存与处理系统3部分组成。其结构示意图见图1。

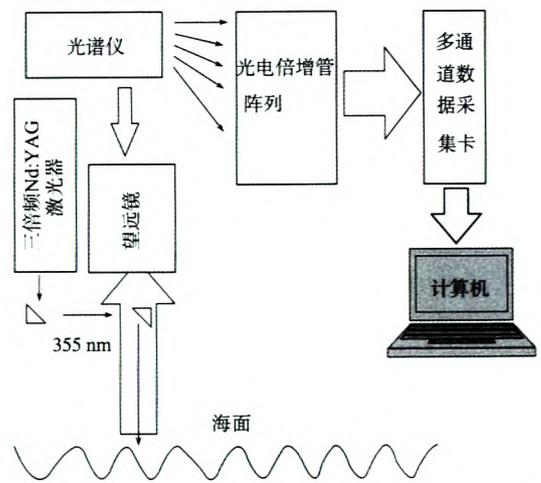


图1 多通道海洋激光雷达溢油监测系统结构示意图

Fig.1 The sketch map of MOLRSOS System

同轴发射与接收系统的主要部件包括:脉冲激光器、激光谱线反射镜、激光高反镜、卡塞格林望远镜。

· 基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2006AA06Z415)资助
收稿日期:2009-10-14;修订日期:2010-01-10
作者简介:李晓龙(1985-),男,硕士生. E-mail:llxxaa5@163.com

其中脉冲激光器为3倍频Nd:YAG激光器,工作波长为355 nm(>40 mJ),脉冲频率为1~5 Hz,光束发散角 ≤ 1 mrad;激光谱线反射镜的中心波长为355 nm,入射角 $45 \pm 3(^{\circ})$,反射率 $\geq 99.5\%$;激光高反镜的中心波长为355 nm,入射角 $45 \pm 3(^{\circ})$,反射率 $\geq 99\%$;接收采用卡塞格林望远镜,口径大小为200 mm,焦距2 032 mm;由望远镜、耦合透镜和光纤组成的接收子系统视场角 ≤ 2.11 mrad。

系统采用发射与接收同轴的光路结构,目的解决非同轴光路接收远距离目标信号时调节范围局限的问题。与旁轴接收光路相比,该结构可以有效接收目标信号,提高雷达接收系统信噪比。

分光与光电转换系统分为分光结构和光电转换两部分。分光结构中使用的闪耀光栅进行分光,光栅参数为600刻痕/mm,光栅的有效使用面积为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,光谱分辨率为10 nm;采用Hamamatsu公司生产的H7260系列多通道光电倍增管作为光电转换元件,它具有体积小、通道多且性能稳定,有利于系统集成等优点;在光电转换之后采用脉冲信号放大电路对荧光信号放大。

MOLRSOS系统具有24个探测通道,各通道的工作光谱范围见表1。

表1 MOLRSOS系统的探测光谱范围

Table 1 Spectral rang of MOLRSOS

通道 Channel	光谱范围/nm Spectral rang	文中标示 Label
第1至第20通道	370~570 (通道间隔为10nm)	ch1~ch20
第21通道	590~600	ch21
第22通道	610~620	ch22
第23通道	640~650	ch23
第24通道	680~690	ch24

信号采集、储存与处理系统由数据采集卡、外部触发电路和计算机组成。数据采集卡采用美国NI公司

生产的PCI-5105,该卡支持RTSI总线同步技术,是8通道A/D卡,采样率为60 M/s;计算机采用扩展插槽式工控机,设置与NI PCI-5105数据采集卡相配套的插槽,可实现多个数据采集卡同步采集。采集控制信号由外部光电触发电路提供,采用双引脚高速PIN管作光电转换部件。采用VC++编程环境编写用户界面并实现数据采集、储存和实时处理功能。

MOLRSOS系统将望远镜接收到的目标信号进入分光与光电转换系统,经光谱仪分光,由光电倍增管(PMT)转换为电信号,并放大输出;与此同时,信号采集、储存与处理系统在接收到外部光电触发信号后,采集各个通道的电信号,利用自行开发的OilDetector软件将它们的强度-时间谱和荧光光谱显示于屏幕,同时可储存相应时间的信号数据。MOLRSOS系统工作的光谱范围既包含了荧光信息的连续波段(370~570 nm),又包含荧光通道相关性很小的特征波段(590~600 nm, 610~620 nm, 640~650 nm, 680~690 nm)^[5],因此它可以用于探测海表面油膜,海水CDOM和叶绿素等多种目标。对采集到的信号进行进一步的信息提取,可以获得更多的海洋参数,为雷达目标的识别和分析提供更多参考依据。

2 高台实验及结果分析

2.1 高台系统测试实验

高台实验雷达系统平台搭建于青岛海岸的东海国际饭店顶楼(如图2所示),经纬度为 $N36^{\circ}02'52.5''$ 、 $E120^{\circ}20'24.1''$,该实验平台垂直高度125 m,平台至海岸边缘和海滩上目标设定位置的直线距离分别为180和160 m左右。

实验目的是模拟该雷达系统在高空、远距离情况下进行海面监测的实验条件,通过实地探测海面目标及海岸人为制作目标,获得目标的受激荧光信号,提取其光谱特征,以此验证所研制雷达系统性能的可靠性。

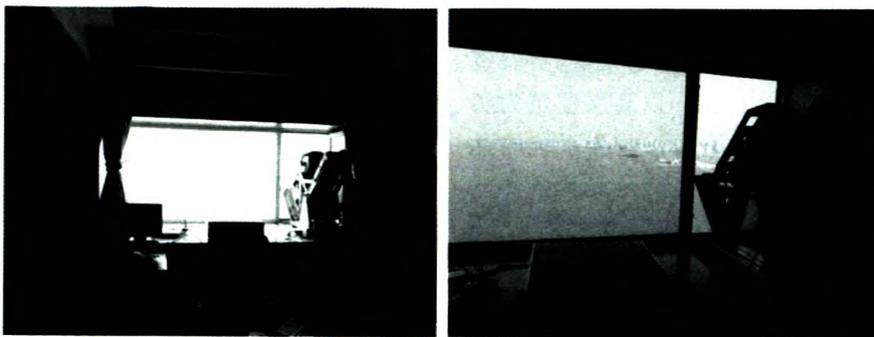


图2 高台实验系统实物图

Fig. 2 The photographs of MOLRSOS system on the platform 125 meters high

本次实验共采集 4 类目标的受激荧光数据,依次为近岸海水、树木、在容器中放入样本(包括海水样本、0#柴油样本和 93#汽油样本)及海岸沙滩,以检验雷达系统的目标探测和识别能力。雷达系统在夜晚和白天两种时间段分别进行探测工作,以检验天空背景光对系统的影响,测试该系统的 24 h 实时工作能力。高台实验共测量 7 组数据,即夜晚、白天近岸海水、岸边目标容器中海水、0#柴油、93#汽油、岸边树木以及海岸沙子的荧光数据。

为保证实验测量过程中测量条件的一致性,实验过程中保持使用的 3 倍频 Nd:YAG 激光器工作状态稳定,即数据存储时采用脉冲频率为 5 Hz、355 nm 激光输出能量为 42 mJ(脉冲能量起伏 $<10\%$),另外,光电倍增管供电、工控机采集状态以及所采集的光谱波段均保持不变。考虑到单个激光脉冲的能量会有相对的波动,为了减少它对测量结果的影响,数据处理时采用相同脉冲数目的数据做平均处理,获得相应目标的荧光光谱图(图 3、4 和图 6~图 10)。

2.2 实验结果与分析

高台实验中 MOLRSOS 系统对 4 类不同的目标(近岸海水、树木,以铁桶为容器的海水、水面上布有 0#柴油和 93#汽油,及海岸沙滩的沙子)进行测量,其中,对近岸海水分别在 2009 年 08 月 27 日 20:13 和 08 月 28 日 08:57 进行目标探测。实验获得雷达目标的信号谱,包括距离-强度信号(左侧图(a),左右依次为奇数通道和偶数通道),及荧光光谱信号(右侧图(b)为目标荧光光谱)。在整个实验过程中,严格保持雷达测量条件的一致,雷达采集时间分辨率为 16.7 ns,相应的距离分辨率为 2.5 m。从结果可以看出,距离 200 m 处近岸海水(图 3、图 4)、160 m 处岸边人为设置目标(图 7~9)、80 m 处大树目标(图 6)和海岸上沙子所被测量信号的改变,其各个通道的距离信号也发生相应的变化。与时间、距离序列的信号识别同理,MOLRSOS 系统在进行大面积海区监测时,海面上各个激发光斑区域的荧光信号随时间地点变化,结合 GPS 记录的数据,就可以获得时间-扫描路径(或地点)-荧光信号强度的雷达信号谱^[6]。

通过图 3 和 4 的信号比较,采用脉冲信号放大电路,可以看出白天背景光对荧光信号的影响不大,主要是由于采用脉冲信号放大电路对作为直流项的背景光信号不起放大作用,保证该系统可以全天时进行监测工作。另外,从图中可以看出,本次测量的青岛近岸区域海水的拉曼信号特征较为明显。

将该雷达系统远距离测量的海水荧光信号(图 3、4),与实验室环境下使用 OceanOptics S2000 光谱仪测量的海水样品荧光光谱(图 5)进行比较,可以得到一致

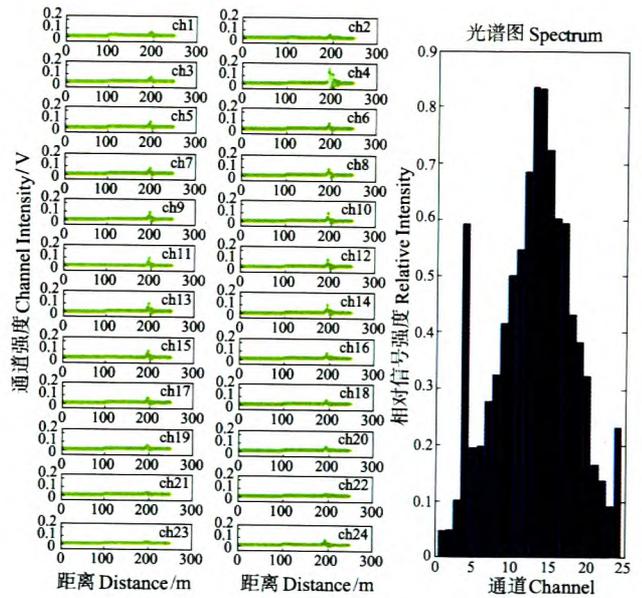


图 3 夜晚近岸海水的信号

Fig. 3 The lidar signal of inshore seawater

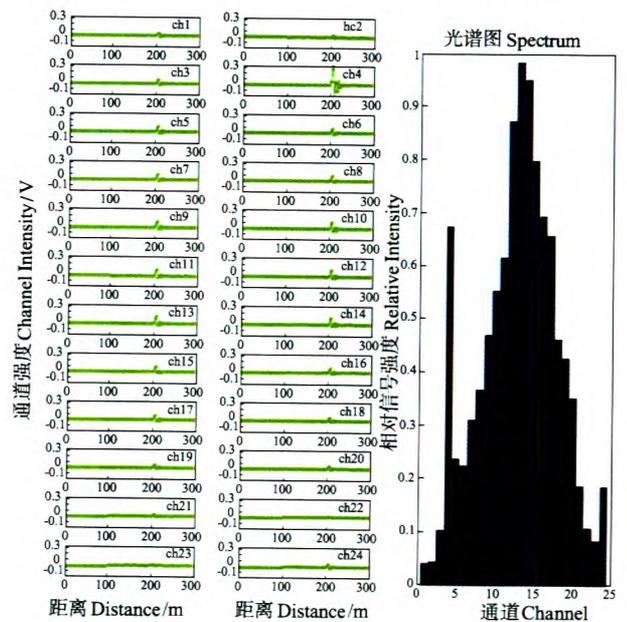


图 4 白天近岸海水的信号

Fig. 4 The lidar signal of inshore seawater detected during the sunny day

的光谱分布效果。该结果中,在连续可见光波段的通道区域,海水的荧光光谱峰值位于 490~500 nm 之间,这与 355 nm 激发海水可溶性有机物(CDOM)所获得的光谱峰值在 450 nm 附近^[7]的结论不符,这说明该区域海水中可能存在其它荧光物质成分,导致其所被激发的荧光峰值发生改变。

通过对图 3~10 中各通道信号强度和目标荧光光谱的相互比较,可以看到:

图 6 中的雷达信号谱,是对于容器中装有近岸区域海水的荧光信号,与近岸海水的荧光信号(图 3 或 4)对比,海水样本的各通道信号强度均降低,且拉曼通道

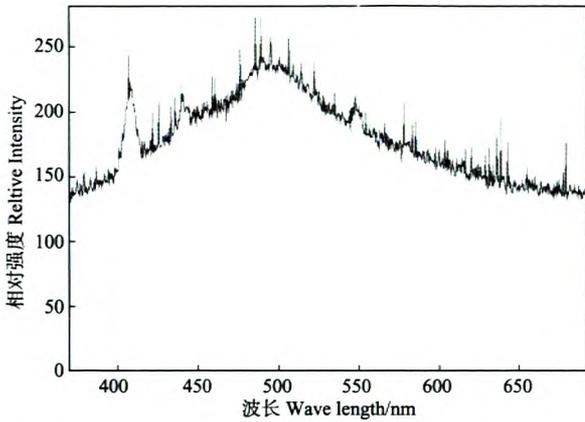


图5 OceanOptics S2000 光谱仪测量海水荧光光谱图
Fig. 5 Fluorescence spectrum of inshore seawater measured by OceanOptics S2000

相对强度下降,对该变化可能产生影响的因素有:容器中海水的体积较小,受激发产生的荧光相对较弱,或容器未经彻底清洁,使测量水面上形成一些小面积的杂质膜,使得拉曼信号受到一定程度的衰减。同时对连续可见光波段的通道信号进行比较,光谱峰值有所差异。经对容器进行检查,可能由于铁桶上残留的有机杂质影响了连续可见光波段的通道区域荧光的测量。

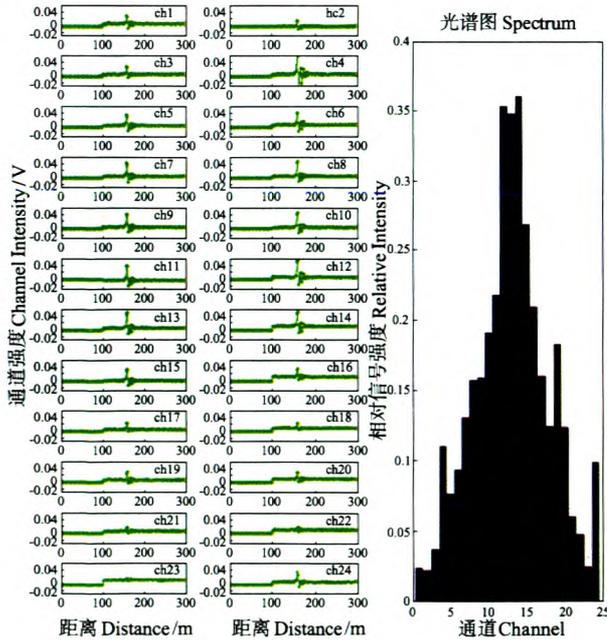


图6 岸边目标容器中海水的信号

Fig. 6 The lidar signal of seawater in the container

图7为容器装有近岸区域海水并在其上铺有20 mL量0#柴油油层的受激荧光信号,与图6中容器中海水的荧光信号对比,海水拉曼通道的信号特征有明显的下降,这是因为拉曼后向散射信号经过油膜而被衰减^[8];同时在连续可见光波段的通道区域,荧光信号强度增大,光谱谱形趋向于0#柴油样品的激光荧光信号;第24通道显示,无叶绿素荧光信号,可证实

685 nm荧光信号经该厚度的0#柴油油层衰减为0。

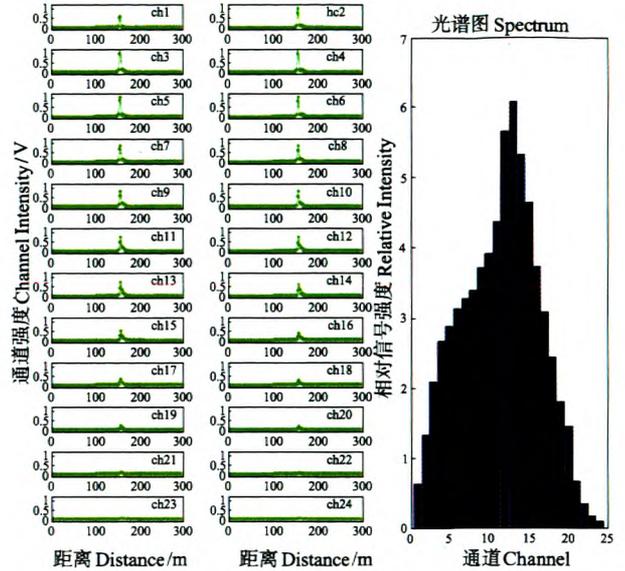


图7 容器中0#柴油目标的信号

Fig. 7 The lidar signal of 0# diesel oil on the seawater

图8所示信号则为采用93#汽油、用量也为20 mL,布于容器中海水水面上所获得的雷达信号。与图6中容器中海水的荧光信号对比,拉曼通道的信号强度增大,但相对相邻通道的信号比值明显下降,未加油膜的海水所测荧光信号中第3、5通道和第4通道的比值: $ch4/ch3=2.19$ 、 $ch4/ch5=1.74$,而此时存在汽油油膜 $ch4/ch3=1.54$ 、 $ch4/ch5=1.49$ 。在连续可见光波段的通道区域,信号强度增大,光谱谱形趋向于93#汽油样品的激光荧光信号。第24通道显示,叶绿素荧光信号强度降低,同上述容器中海水加入柴油油膜后的信号变化,685 nm 荧光信号被93#汽油油层衰减,但与之不同的是,685 nm 信号并没有被完全衰减,对第4、13和24通道的比值变化进行比较,未加油膜的海水 $ch24/ch4=0.49$ 、 $ch24/ch13=0.75$,经汽油油膜衰减后 $ch24/ch4=0.41$ 、 $ch24/ch13=0.59$;从比值的变化来看,第24通道与第13通道之间的比值变化相对明显,与第4通道相比,第13通道作为93#汽油受激荧光的峰值通道,其通道信号增幅相对大,叶绿素荧光的衰减表现的更为明显。

比较图7和8的海水水面油膜的荧光信号,在形成相同油膜厚度(约0.15 mm厚)的情况下,由于93#汽油的透明度高、其荧光效率相对0#柴油的低,其荧光信号中海水拉曼通道的信号和叶绿素荧光信号的衰减相对较少,但相对于未加油膜的海水荧光信号,有明显的衰减。

实验过程中,采用轻质油,即0#柴油和93#汽油,主要是为了避免重质油形成油膜的时间长和操作复杂的缺点,能够在近似定量油膜厚度的情况下获得雷达测量效果;当然,0#柴油和93#汽油的扩散性好、

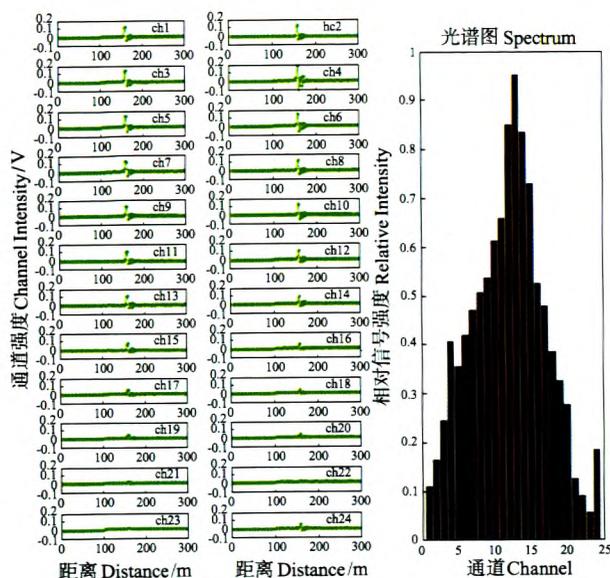


图 8 容器中 93# 汽油目标的信号

Fig. 8 The lidar signal of 93# petrol on the seawater

透明度高,实际海面上形成的油膜固然要比实验所制作油膜薄很多,所测荧光信号强度可能相对小。

根据不同种油的荧光效率,及相对应采集波段的荧光衰减系数,利用海水拉曼的变化^[9],可以提取油膜厚度信息,公式为:

$$K_i = \eta_i P_0 \{1 - \exp[-(k_e + k_i)d]\} + \zeta_i P_0 \exp[-(k_e + k_i)d] + \delta_{ir} \Psi P_0 \exp[-(k_e + k_i) \cdot d] \quad (1)$$

式中, P_0 为激发光功率; K_i 是在 i 通道接收到的总荧光信号; η_i 在 i 通道波段内油的荧光转化效率; ζ_i 在 i 通道的波段内水体的荧光转化效率; k_e 为激发波长在油中的衰减系数; k_i 为 i 通道的波段对应的波长在油中的衰减系数; d 为油膜厚度; Ψ 为水体的 Raman 转化效率; δ_{ir} 为 δ 函数。

公式(1)右边第 1 项为油荧光功率;第 2 项为水的荧光功率,主要由于水中存在 CDOM 和悬浮于水中可被诱发出荧光的颗粒;第 3 项为激发水体的 Raman 信号,它主要受水体环境的影响,水体环境不变时,对于一定范围的油膜厚度,该信号随油膜厚度的增加而减小,因此可用于反演油膜厚度。

一般情况下,实验测量时必须满足 2 个条件:

- ① 所测油膜厚度小于固定激光能量的激发光在该油中穿透的距离;
- ② 经油膜衰减后的激发光在水体中的传播距离,要小于激发光传播方向上的水体厚度。

图 9 中树的荧光谱第 24 通道的 685 nm 叶绿素荧光信号特征明显,与图 3 或图 4 中近岸海水的荧光信号对比,拉曼通道处信号没有明显特征,峰值通道向长波方向移动,峰值由第 13 通道变为第 15 通道(510~520 nm)。

图 10 为海岸沙滩上的沙子所被激发出的荧光信

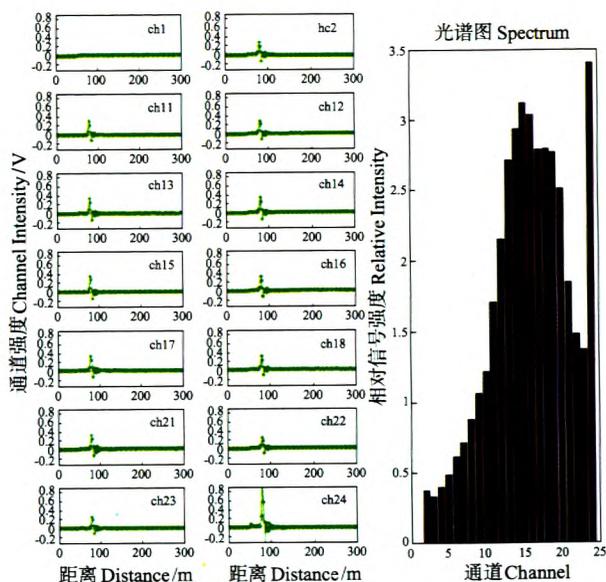


图 9 目标树的信号

Fig. 9 The lidar signal of trees

号。图(a)中第 24 通道信号明显较强,该通道为叶绿素荧光通道,信号脉冲峰值为 0.299 V;与之比较,第 11~15 通道的信号峰值强度依次为 0.018, 0.028, 0.030, 0.029 和 0.034 V,远小于第 24 通道信号的强度。图(b)是利用多次脉冲信号累加获得的沙子荧光光谱,该光谱的叶绿素荧光特征明显,可以看出,对于沙子,除第 24 通道以外,其它通道的荧光信号较弱,所形成光谱的特征不明显。沙子的主要成分为无机物,该系统光谱接收范围内的受激荧光应该基本为零^[10],经实地检查证实,连续光谱波段的微弱荧光信号可能由沙子中含有少量有机物造成,近海沙滩表层存在一些微小海藻,这造成该处沙滩受激发产生 685 nm 波长信号。

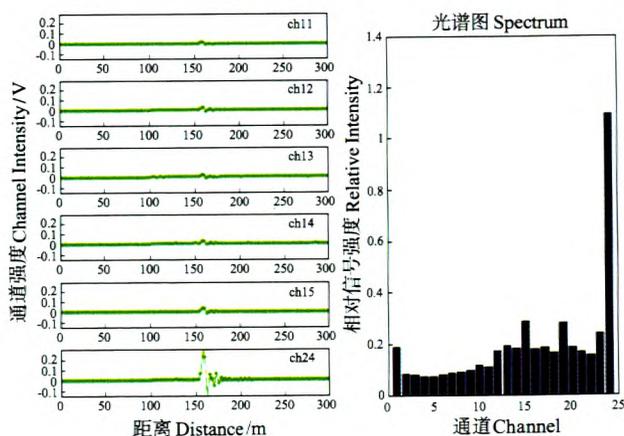


图 10 海岸沙子的信号

Fig. 10 The lidar signal of coastal sand

3 结语

本文基于多通道海洋激光雷达溢油监测系统利用高台,对近岸海水、选定样本和树木等目标进行测量,

提取时间、距离及荧光光谱信息,并结合前人的研究结果进行分析。从实验结果来看,多通道海洋激光雷达溢油监测系统具备全天时监测能力,能够比较准确地进行海上目标的测量,可以利用特征荧光光谱区分被测目标。拉曼通道可以作为判断是否存在油膜的依据,但不能单纯地利用通道的信号强度,如图8中的0#柴油雷达信号并未出现第4通道信号变弱甚至消失的情况,而拉曼通道与相邻通道信号强度的比值关系能够体现水面存在油膜时发生的变化;并且叶绿素荧光波长685 nm通道信号也受油膜影响而发生明显的衰减(见图7和8),可以与拉曼信号共同用来反映油膜厚度的变化趋势,获得油膜厚度信息。同时,为了能够利用海水拉曼通道的变化来反演油膜厚度的变化,在人为制作油层目标时,要确保激光能穿透所制作的油膜,同时保证激光不能穿透容器中的样品,减少环境因素的影响。

另外,通过增加现场试验的油样品种类,有效制作可被测量的重质油油膜,进一步地检验系统的测量性能;考虑实验环境和水质因素对实验测量的影响,在提取目标荧光特征时,为了能够更有效地提高判别精度,可以增加高光谱采集部件,测量波长分辨率更高的光谱,有利于荧光特征的分析与处理。

由于海面制作油膜的工作无法实施,所以本次高台实验并未能获得海面上的油膜荧光信号,将在下一步实验中进行,以达到实际海面上油膜的测量目的,验证MOLRSOS系统的工作性能,以实现机载系统的海洋环境监测应用。

参考文献:

- [1] Measures R M, Bristow M. The development of a laser fluorosensor for remote environmental probing [J]. *Can Space J*, 1971, 17: 421.
- [2] Fantasia J F, Ingrao H C. Development of an experimental airborne laser remote sensing system for the detection and classification of oil spills [C]. *Proc of 9th Inter Symp on Remote Sensing of Environment*, 1975: 15.
- [3] Carl E. Brown, Mervin F. Fingas. Review of the development of laser fluorosensors for oil spill application [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47: 477 - 484.
- [4] 张凯临, 贺岩, 李志刚. 机载海洋激光荧光雷达叶绿素a测量性能模拟和初步机载实验 [J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2006, 36(5): 790-795.
- [5] 刘智深, 丁宁, 赵朝方, 等. 主成分分析法在油荧光光谱波段选择中的应用 [J]. *地理空间信息*, 2009, 7(3): 12-15.
- [6] O'Neil R A, Buja-Bijunas L, Rayner D M. Field performance of a laser fluorosensor for the detection of oil spills [J]. *APPLIED OPTICS*, 1980, 6: 863-870.
- [7] Wayne Wright C, Frank E. Hoge, et al. Next-generation NASA airborne oceanographic lidar system [J]. *Applied Optics*, 2001, 3: 336-342.
- [8] Violetta Drozdowska, Sergey Babichenko. Natural water fluorescence characteristics based on lidar investigations of a surface water layer polluted by an oil film; the Baltic cruise - May 2000 [J]. *Oceanologia*, 2002, 44(3): 339 - 354.
- [9] Michael Bristow, David Nielsen. Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorosensor data for effects of water optical attenuation [J]. *Applied Optics*, 1981, 17: 2889-2906.
- [10] 林彬, 安居白. 海面溢油油种激光遥感ANN探测方法的研究 [J]. *海洋环境科学*, 2004, 23(1): 47-49.

The Experiment of Multi-Channel Oceanographic Laser Remote Sensing of Oil Spills System at High Platform

LI Xiao-Long, ZHAO Chao-Fang, QI Min-Jun, MA You-Jun, LI Zhi-Gang, LIU Zhi-Shen
(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The hardware architecture of Multi-channel Oceanographic Lidar Remote Sensing of Oil Spill (MOLRSOS) System was introduced, and the experiment was carried out on Aug. 27-28/2009 at a platform 125 meters high. The third harmonic of a Nd:YAG laser (at 355 nm) is used as the excitation source. The backscattered fluorescence collected by a 20cm Cassegrain telescope was dispersed by a diffraction grating spectrometer with the spectral range of 370-690 nm. The entire fluorescence spectrum was transformed into electrical signals by multi-channel photomultiplier tube (PMT) detector. A variety of lidar signals were received in daytime and at night, and the targets were distinguished by analyzing the characteristics of fluorescence spectrum. The experimental results show that MOLRSOS system owns the capability of detecting oil spills and other objects according to their stimulated fluorescence.

Key words: multi-channel oceanographic lidar; stimulated fluorescence; oil spill; fluorescence spectrum; Raman signal