

荧光激光雷达技术探测水面油污染系统仿真研究

景敏 华灯鑫 乐静

Simulation of fluorescence lidar for detecting oil slick

Jing Min Hua Deng-Xin Le Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 070704 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.070704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.070704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

同步辐射中双压电片反射镜的研究现状

Present research status of piezoelectric bimorph mirrors in synchrotron radiation sources

物理学报.2016, 65(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010702>

基于激光诱导叶绿素荧光寿命成像技术的植物荧光特性研究

Study of plant fluorescence properties based on laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime imaging technology

物理学报.2015, 64(19): 190702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190702>

一种新型的用于差分吸收激光雷达中脉冲式光学参量振荡器的种子激光器的频率稳定方法

A novel frequency stabilization method for the seed laser of the pulse optical parametric oscillator in differential absorption lidar

物理学报.2015, 64(2): 020702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020702>

有限远共轭显微镜光镊设计和误差分析

Design and error analysis for optical tweezers based on finite conjugate microscope

物理学报.2013, 62(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.100701>

基于多重散射强度和偏振特征的舰船尾流气泡激光探测方法

Laser detection method of ship wake bubbles based on multiple scattering intensity and polarization characteristics

物理学报.2013, 62(6): 060704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060704>

荧光激光雷达技术探测水面油污污染系统仿真研究*

景敏¹⁾²⁾ 华灯鑫^{1†} 乐静¹

1)(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

2)(陕西理工学院机械工程学院, 汉中 723000)

(2015年12月23日收到; 2016年1月22日收到修改稿)

为实现对水面油污的探测, 根据荧光激光雷达系统的发展趋势, 采用激光诱导荧光技术, 建立了适用于水面油污探测荧光激光雷达的系统模型. 提出采用单激光器结合增强电荷耦合器件的小型荧光激光雷达探测系统, 通过分析激光器单脉冲能量与探测浓度之间的关系, 结合荧光激光雷达系统参数, 对系统模型的探测能力与信噪比等进行了数值仿真. 结果表明, 系统选用单脉冲能量 50 μJ 的 355 nm Nd:YAG 激光器作为激发光源, 白天在 7 m 的距离处探测信噪比可以达到 10, 满足实验室搭建模拟系统的要求. 针对实际探测水面油污, 提出采用增大激光器功率的方法, 并通过模拟计算验证了采用 50 mJ 的单脉冲能量激光器在 230 m 的探测距离处可得到与实验室相同的结果, 对实际系统的搭建具有指导意义.

关键词: 激光诱导荧光, 荧光激光雷达, 水面油污, 信噪比

PACS: 07.60.-j, 42.68.Wt, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.65.070704

1 引言

地球表面 71% 被水覆盖, 水资源的质量影响着人类的生存环境. 据报道, 存在于江、河、湖、海等水资源中的各种有机物达 2000 多种, 其中许多有机污染物直接威胁人类健康, 或伤害水中生物. 各种油类是常见的也是数量最大的水体污染物. 水体污染绝大多数是石油产品, 它们大多富含苯、多环芳烃等对人体有危害且具有挥发性的物质. 水中的浮油可以形成极薄(亚微米厚)的薄膜, 因此, 极少量油污便能形成严重的危害.

石油产品中包含多种发射荧光基质, 如单环、多环芳香族碳氢化合物^[1]. 这些化合物具有如下特点: 当被具有适当波长和能量的激光照射时, 会发出特有波长的荧光. 激光诱导荧光(laser induced fluorescence, LIF)技术是利用激光激发油类物质发射荧光, 对荧光信号进行采集并经光电转换后可获得相应的荧光光谱数据, 而荧光光谱直接同物质的分子结构有关, 利用荧光光谱的强度和形状可以

作为鉴别石油产品的依据, 这就是用激光诱导荧光方法对石油产品进行探测的基础. 激光荧光遥感是一种主动式遥感, 具有全天候、全气象等优点, 是目前最有效的监测溢油技术手段^[2].

早在 20 世纪 70 年代, 美国研制了机载海洋激光雷达系统(AOL), 最新改进的 AOL-3 系统采用单激光器同时激发 532 nm 和 355 nm 两个波长, 采用七个通道的接收系统接收来自于海水的瑞利散射、拉曼散射、有色可溶性物质(colored dissolved organic matter, CDOM)等受激发射的荧光光谱^[3]; 20 世纪 90 年代, 德国 Oldenburg 大学成功研制了海洋激光雷达系统, 采用 308 nm XeCl 准分子激光器和 383 nm 抽运染料激光器, 接收系统采用 20 cm 口径望远镜, 共采用通道带宽 10 nm 的探测通道 12 个, 可用于在 100—300 m 的飞行高度对不同油种进行识别和测量油膜厚度, 并可对北海、波罗地海的水域实现水文参数、溢油情况的实时监测^[4]; 韩国采用直升机作为运载平台研制的机载激光雷达系统, 可对水体中的叶绿素 a 浓度和 CDOM 及地面

* 国家自然科学基金(批准号: 61275185)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xauthdx@163.com

植被进行探测,工作时飞行高度可以达到530 m^[5];日本海上技术安全研究所设计的采用355 nm激发波长,脉冲重复频率8 Hz,采用4个透镜及光学滤光片结合增强电荷耦合器件(intensified charge-coupled device, ICCD)作为光电转换元件探测海面油污和海水中的CDOM的小型机载荧光监测激光雷达,并于2007年进行了成功的飞行试验^[6].而我国在1988年就由国家海洋局第一海洋研究所在青岛胶州湾海面附近利用船载激光雷达进行了水面溢油鉴别探测实验;2001年,中国海洋大学在国家“863”计划的支持下,成功研制了用于海洋参数测量的海洋荧光激光雷达系统,并于2006年开展多通道海洋激光雷达溢油检测技术的研究,多次完成水面油膜的探测实验^[7].这些荧光激光雷达系统体积较大,业务化运行成本较高,通常需搭载于直升飞机进行使用,仅适用于海面及沿海水域监测.随着电子技术和激光器的进步,单激光器、高集成小型化的系统是必然发展趋势,搭载于小型无人飞机上使用将使得其应用更为广泛,不仅对于海面溢油可以进行监测,还可以探测到冰面及水下的溢油情况^[8].

激光雷达遥感技术在气象和大气环境监测^[9]、生态环境监测^[10,11]及军事领域有着广泛的用途.对于激光雷达系统而言,根据被测物理量的特性选择合适的系统参数以及对系统模型的探测能力有一个初步的判定,从而指导实际系统搭建,这一点尤其重要.本文针对水面石油类污染物的检测,提出一种采用单激光器的小型荧光激光雷达系统,并利用ICCD具有良好时间分辨率及可达到纳秒量级的时间门控的特性,设计一种用于水面浮油探测的荧光激光雷达模型,通过分析比较模型的不同性能参数及性能评价指标,利用激光雷达方程对系统模型的探测能力进行仿真,对实际系统搭建具有指导意义.若系统采用德国CRYLAS公司FTSS 355-50型单脉冲激光器,采用空气制冷,激光器长度只有217 mm,结构紧凑,体积小;采用美国Princeton Instruments公司的PI-MAX4型ICCD,重量不超过6 kg;而整个系统重量不超过25 kg,完全可以搭载与无人飞机上执行检测任务.

2 荧光激光雷达探测原理

激光诱导荧光,即当介质受到激光照射后,使原本处于平衡状态的电子吸收特定波长的光子能

量,跃迁到激发态的不同振动能级上.而跃迁后,能量较大的激发态电子在 10^{-15} s的时间内,因分子间的碰撞或晶格间的相互作用会损失一部分能量,从较高振动能级下降到低振动能级,处于第一激发态最低振动能级上的电子极不稳定,在短时间(10^{-9} — 10^{-6} s)内发射一个光子从而返回到基态,这时所发射的光称为荧光^[12].因为荧光是由激发态最低能级的分子跃迁回基态释放的能量,而在振动弛豫过程中会损失一部分能量,所以荧光的能量小于吸收光的能量,故荧光波长总会比激发光波长要长一些.

油类由于属于含有苯环状结构的芳香族,所以有良好的荧光发射物质.受激发射的荧光波长由入射激光的波长和受激物质的分子结构所决定.物质分子结构不同,所发射荧光波长不同;即使相同分子结构的物质,用同一波长的激光激发时,产生相同的荧光,光谱形状保持不变,但荧光的强度会随着激发光的强度及物质的浓度发生变化.根据不同油受激发射的特殊波段荧光光谱,利用此发射荧光光谱分析化合物组成并确定特性参数,从而来定性鉴别物质,这是鉴别溢油的基础.

3 水面浮油探测荧光激光雷达系统模型设计

水面浮油探测荧光激光雷达系统模型如图1所示,由激发系统、接收系统、测量与控制系统组成.激发系统主要有激光器、扩束镜组成,接收系统由透镜、滤光片及ICCD组成.控制和数据处理由计算机完成.

系统采用激光器作为激发光源,光束经过透镜 L_1 扩束 L_2 准直后,再由反射镜M使其均匀照射于待探测的水面上.由水面油膜产生的荧光经过接收透镜 L_3 接收,再经一滤光片F后由ICCD传递给计算机存储及处理.同时,利用计算机控制激光器及ICCD的工作状态,实现激光发射与荧光接收在时间上的同步,保证在接收到全部荧光信号的同时减少背景噪声,提高系统信噪比.该系统选用Nd:YAG激光器,因为该激光器应用广泛、技术成熟,适于民用且对人眼较安全;选择其三倍频355 nm波长作为激发光源,因为这一波长大气衰减较小,并且便于与其他物质的荧光相区别.因为海水的主要成分有纯水、溶解物质以及悬浮物质等,其中最主要的荧光物质是黄色物质(CDOM)和叶绿素,它

们受激发射的荧光峰值不同. 如黄色物质的中心波长在 420 nm, 叶绿素的荧光峰在 685 nm, 而原油的荧光区在 400—600 nm, 峰值中心波长 480 nm, 这样就可以区分出水中的各种成分 [13]. 由于油膜发出荧光很弱, 采用传统的光电转换器件较难实现测量, 而 ICCD 具有量子效率高、动态范围大、图像分辨率高、响应速度快、集成度高、稳定性好且具有选通功能等特点, 在荧光测量中经常使用.

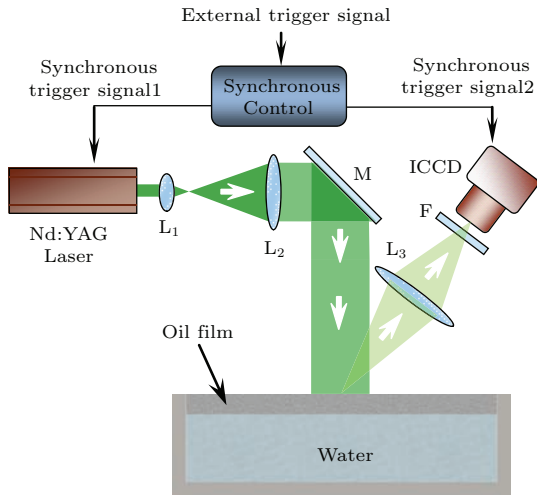


图1 激光诱导油荧光光谱测量原理框图
Fig. 1. Schematic of laser induced oil fluorescence spectral measurement principle.

4 模拟计算与分析

为了对上述的油荧光雷达测量系统探测能力有初步的了解, 需进行数值模拟. 根据激光荧光雷达的工作原理, 可以推导出系统接受到的荧光信号光子数方程 [14]:

$$M(R) = \frac{\eta(\lambda)\lambda}{hc} E_L K_0(\lambda) T(R_0) \xi(R) \frac{A}{R^2} \times N(R) \frac{\sigma^F(\lambda_L, \lambda)}{4\pi} \frac{c\tau_d}{2} e^{-\sigma(R-R_0)}, \quad (1)$$

式中, $M(R)$ 为接受到的荧光信号光子数; E_L 为激光能量; R 为激光雷达探测距离, R_0 为浮油所处位置到激光雷达系统的距离; $\eta(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的量子效率; λ 和 λ_L 分别为荧光光谱中心波长和激发波长; A 为接收系统的口径; $K_0(\lambda)$ 为激光雷达系统的滤波函数; $\xi(R)$ 为几何覆盖因子, 假定为 1; 大气传输因子 $T(R)$ 用在边界 R_0 处的值 $T(R_0)$ 乘以浮油介质内的传输因子 $e^{-\sigma(R-R_0)}$ 代替; σ 为油膜消光系数; $N(R)$ 为距离 R 处浮油表面基态粒子数密度; $\sigma^F(\lambda_L, \lambda)$ 为荧光散射截面; τ_d 为探测器

门宽; h 为普朗克常量 (6.626276×10^{-34} J·S); c 为光速 (3×10^8 m·s⁻¹).

$$T(R_0) = \exp \left[- \int_0^{R_0} (\alpha(\lambda_L, r) + \alpha(\lambda, r) dr) \right], \quad (2)$$

其中 α 为大气消光系数, 由大气分子消光系数和气溶胶消光系数两部分组成, 可由经验公式得到 [15].

接收系统接收到的信号中荧光信号并不是唯一的, 大气太阳辐射多次散射和暗电流引起的噪声信号会同时被探测到, 根据基本的辐射理论, 太阳背景辐射的数学表达式 [16]:

$$N_b = \frac{\eta(\lambda)\lambda}{hc} K_0(\lambda) A L_s \left(\frac{\theta}{2} \right)^2 \pi \Delta\lambda \Delta t, \quad (3)$$

式中, θ 为接收系统视场角, L_s 为水面的光辐射亮度, 在夜晚可取为 0; $\Delta\lambda$ 为滤光片的带宽, Δt 为探测时间.

雷达探测水面浮油荧光信号的信噪比可由下式计算出:

$$SNR(R) = \frac{M(R)}{\sqrt{M(R) + 2(N_b + N_d)}} \times \sqrt{n}, \quad (4)$$

式中, N_b 为太阳背景辐射引起的光子数, N_d 为探测系统的暗电流噪声, n 为脉冲数. 信噪比是反映系统探测能力的指标, 由 (4) 式可见, 可以通过采取增大激光单脉冲能量及脉冲数或减小接收系统视场角的方式提高信噪比.

表1 荧光雷达系统参数表
Table 1. Specifications of the lidar components.

参数	参考数值	参数	参考数值
油膜消光系数	0.14	光学系统滤波函数	0.16
待测油膜粒子浓度	10 liters ⁻¹	探测器量子效率	10%
荧光中心波长	480 nm	接收系统口径	100 mm
平均荧光截面	5×10^{-12} m ²	探测器门宽	20 ns
激光器单脉冲能量	5. μ J/50. μ J	滤光片带宽	60 nm
脉冲频率	100 Hz	接收视场角	1 mrad

根据上述公式可以发现, 影响探测系统信噪比的因素主要取决于激光器的各项参数. 在仿真分析前需要对待测油膜及系统参数做初步假设. 由于不同类型石油的光学特性也不尽相同, Camagni 等 [17] 对不同类型的石油进行了实验, 分别得到了它们的消光系数. 本文以 forcados 作为仿真样本, 选取消光系数. 针对不同类型石油, 根据其荧光峰

值波长, 选择不同的滤光片相匹配. 为了更好地分析激光器各项参数对于探测系统性能的影响从而选择合适的激光器, 初步选定系统参数, 列于表 1.

4.1 信噪比的估算

综合选择参数, 可得到单脉冲下系统回波信号在白天和晚上的信噪比廓线图, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 在相同单脉冲能量下, 由于晚上不考虑背景光的干扰, 系统的信噪比可以得到极大的提高; 而在相同信噪比情况下, 系统探测距离随着单脉冲能量的提高而提高. 若以信噪比 $SNR = 10$ 作为荧光激光雷达可以实现对目标物的有效探测的临界值 [16], 则根据以上参数设计的荧光雷达探测系统, 若单脉冲能量在 $50 \mu\text{J}$, 在白天系统的探测距离可达 7 m , 而在晚上可增大到 70 m .

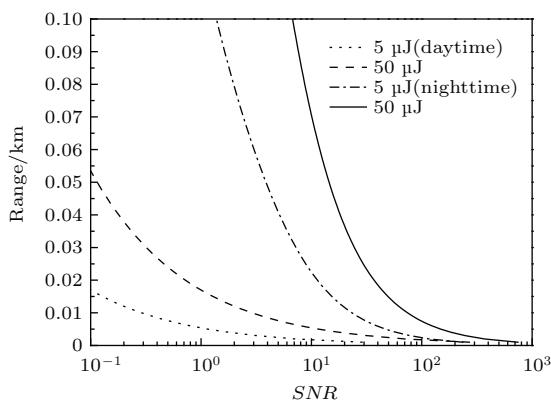


图 2 系统回波信号信噪比廓线图

Fig. 2. SNR profile map of system echo signal.

4.2 最小可探测浓度的估算

若探测系统在白天探测, 天空背景辐射噪声是主要的噪声来源, 此时系统的最小可探测能量由背景辐射噪声决定 [14]:

$$E_s^{\min}(\lambda) = \left(\frac{F_G hc K_0(\lambda) \Omega A \tau_d L_s}{\zeta_e \eta(\lambda) \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} (SNR)^{\min}, \quad (5)$$

其中, $F_G/\zeta_e = 1$, 接收立体角 $\Omega = 2 \times 10^{-6} \text{ sr}$, $SNR = 10$.

当在夜晚天空探测时, 天空背景辐射可以忽略的情况下, ICCD 的暗电流噪声将成为影响最小可探测能量的决定因素:

$$E_s^{\min}(\lambda) = \frac{hc}{\eta(\lambda) \lambda} \left(\frac{F_G i_d \tau_d}{\zeta_e e} \right)^{\frac{1}{2}} (SNR)^{\min}, \quad (6)$$

其中, i_d 是 ICCD 的暗电流.

由荧光激光雷达方程可以推导出某一距离处的最小可探测浓度:

$$N_{\min}(R) = \frac{E_s^{\min}(\lambda)}{E_L K_0(\lambda) T(R)} \frac{R^2}{A \sigma^F(\lambda_L, \lambda)} \frac{8\pi}{c \cdot \tau d} \quad (7)$$

为进一步分析系统的探测性能, 对系统最小可探测浓度进行数值模拟, 可模拟计算出不同距离处最小可探测浓度与探测距离的关系, 如图 3 所示. 在夜间探测, 由于天空背景噪声可以忽略, 所以有较高的灵敏度, 若以系统探测精度为 100 个粒子/L 为阈值, 则对于单激光脉冲为 $5 \mu\text{J}$ 的探测系统, 在白天和晚上的可探测距离可达 7 m 和 53 m ; 对于单激光脉冲为 $50 \mu\text{J}$ 的探测系统, 在白天的探测距离就可以达到 22 m , 而在晚上 100 m 的探测距离内都可以检测到; 为保证系统有较高的灵敏度, 选择单激光脉冲为 $50 \mu\text{J}$ 的激光器, 夜晚在 100 m 处, 该系统的探测精度可以达到 10 个粒子/L 以上, 即使在白天具有较强背景辐射时, 在 7 m 内可达到相同的检测精度. 可见, 按以上参数设计的系统具有较高灵敏度, 可以满足实际应用要求, 该系统可以应用于在实验室模拟水面油污污染的荧光激光雷达检测.

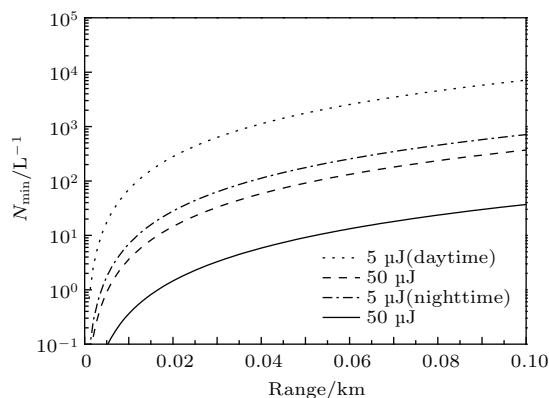


图 3 最小可探测浓度随距离的变化

Fig. 3. Curves of the minimum detectable concentration changing.

4.3 系统所需的最小激光单脉冲能量估算

取最小信噪比 $SNR = 10$, 通过荧光雷达方程可模拟计算出实现水面油污探测所需的最小激光单脉冲能量随探测距离的变化情况, 如图 4 所示. 计算结果表明: 在相同的探测精度条件下, 晚上探测所需激光器的单脉冲能量要小, 大约是白天所需激光器单脉冲能量的 $1/20$; 随着探测浓度的提高, 所需的最小激光单脉冲能量降低. 若以最小探

测浓度 $N = 10$ 个/L 为评判依据, 选单脉冲能量为 $50 \mu\text{J}$ 的激光器在白天可以探测到 7 m 左右, 而在晚上可以探测到 50 m 以外, 这与前面信噪比模拟计算结果相一致, 说明该系统参数选取是合理的. 由图 4 可知, 为实现水面油污荧光探测, 随着探测距离的增加, 所需的最小激光单脉冲能量随距离变化呈指数增长趋势. 若采用单脉冲能量为 $200 \mu\text{J}$ 的激光器, 则在 100 m 的探测距离内可实现夜间的水面油污荧光检测; 采用单脉冲能量为 10 mJ 的激光器, 在 100 m 的探测距离内可实现白天的水面油污荧光检测.

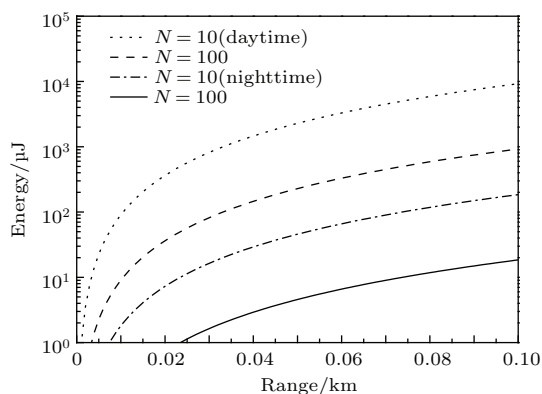


图 4 系统所需最小激发脉冲能量随距离的变化

Fig. 4. Curves of system required minimum excitation pulse energy changing with distance.

4.4 激光单脉冲能量对最小可探测浓度的影响

模拟计算并分析通过增加激光单脉冲能量提高系统检测灵敏度的方法, 如图 5 所示. 取相同信噪比 $SNR = 10$, 模拟计算单脉冲能量为 $50 \mu\text{J}$, $500 \mu\text{J}$, 5 mJ , 50 mJ 时探测系统在白天的最小可探测浓度. 由图 5 可见, 随着单脉冲能量的增大, 检测系统的最小可探测浓度下降, 即检测灵敏度增大, 检测距离增大. 单脉冲能量为 $50 \mu\text{J}$ 的激光器, 在 1 km 处, 检测粒子浓度需达到 $N = 10^5$ 个/L 才具有良好的信噪比; 而单脉冲能量为 50 mJ 的激光器, 相同条件下, 在 1 km 处检测粒子浓度只需达到 $N = 100$ 个/L 就可以具有相同的信噪比.

根据以上分析, 针对实际水面, 通常是海面的油膜检测, 实际探测距离一般在 $100\text{--}500 \text{ m}$, 常用机载激光雷达系统进行探测. 如果按照上述荧光雷达检测系统参数设计的检测系统, 就无法达到理想的检测效果. 若想达到和实验室仿真相同的检测效果, 可以通过选择增大激光器单脉冲能量的方法.

针对实验室模拟探测系统, 选择激光器单脉冲能量 $50 \mu\text{J}$, 重复频率 100 Hz , 功率 5 mW 的激光器, 在距离水面 7 m 内由接收口径为 100 mm 的光学系统接收荧光信号, 在系统信噪比 $SNR = 10$ 的条件下可检测油污粒子浓度 $N = 10$ 个/L; 针对实际机载荧光雷达系统, 只需将激光器更换为单脉冲能量为 50 mJ , 重复频率 10 Hz , 功率为 0.5 W 的激光器, 在系统其余参数均不变的情况下, 就可在距水面 230 m 处得到和实验室模拟探测系统相同的检测效果. 这一结论对实际机载雷达系统的搭建具有指导意义.

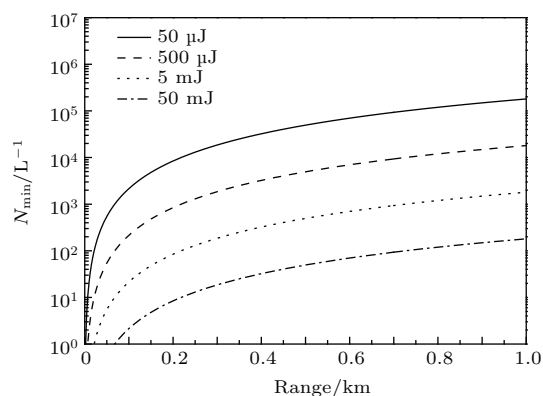


图 5 单脉冲能量对最小可探测浓度的影响

Fig. 5. Influence of the single pulse energy on minimum detectable concentration.

5 结 论

对信噪比进行仿真是激光雷达系统设计的前提, 同时也是验证设计方案合理性的理论基础. 本文从理论上分析了荧光激光雷达对水面浮油荧光信号的探测能力, 设计提出一种采用单脉冲激光器及 ICCD 的小型激光雷达系统; 根据激光雷达方程、大气模式以及激光雷达的系统参数对水面浮油探测系统接收荧光信号的信噪比进行了仿真计算, 模拟计算了不同影响因素下的荧光信号信噪比的垂直廓线, 选择了合适的激光雷达及接收系统参数可以达到实验室条件最低检测粒子浓度 $N = 10$ 个/L 的要求; 针对实际机载激光雷达系统, 提出通过增加激光雷达单脉冲能量的方法可达到和实验室相同的探测效果, 并模拟计算验证可行性, 得出在实验室系统其他参数不变的情况下, 只需将激光器单脉冲能量增大到 50 mJ , 就能在 230 m 的距离处保持最小信噪比为 10 , 检测到粒子浓度为 10 个/L 的荧光信号.

参考文献

- [1] Tang Y H, Liu Q S, Meng L, Liu H C, Liu X, Li C X 2015 *Spectros. Spect. Anal.* **35** 424 (in Chinese) [唐远河, 刘青松, 蒙磊, 刘汉臣, 刘骞, 李存霞 2015 光谱学与光谱分析 **35** 424]
- [2] Sun L J, Tian Z S, Ren X Y, Zhang Y C, Fu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134211 (in Chinese) [孙兰君, 田兆硕, 任秀云, 张延超, 付石友 2014 物理学报 **63** 134211]
- [3] Wright C W, Hoge F E, Swift R N, Yungel J K, Schirtzinger C R 2001 *Appl. Opt.* **40** 336
- [4] Brown C E, Fingas M F 2003 *Mar. Pollut. Bull.* **47** 477
- [5] Lee K J, Park Y, Bunkin A, Nunes R, Pershin S, Voliak K 2002 *Appl. Opt.* **40** 401
- [6] Masahiko S, Kazuo H, Hiroshi Y 2008 *Proc. Visual Inf. Inst.* **28** 9
- [7] Li X L, Zhao C F, Ma Y J, Liu Z S 2014 *J. Ocean Univ. China* **13** 597
- [8] Fingas M F, Brown C E 2013 *Mar. Sci. Eng.* **1** 10
- [9] Cheng S Y, Xu L, Gao M G, Li S, Jin L, Tong J J, Wei X L, Liu J G, Liu W Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 129201
- [10] Noh Y M, Muller D, Lee H, Choi T J 2013 *Atmos. Environ.* **69** 139
- [11] Wan W B, Hua D X, Le J, Yan Z, Zhou C Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 190702 (in Chinese) [万文博, 华灯鑫, 乐静, 闫哲, 周春艳 2015 物理学报 **64** 190702]
- [12] Men Z W, Fang W H, Li Z W, Qu G N, Gao S Q, Lu G H, Yang J G, Sun C L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084206
- [13] Guo J J 2011 *Ph. D. Dissertation* (Qingdao: Ocean University of China) (in Chinese) [郭金家 2011 博士学位论文 (青岛: 中国海洋大学)]
- [14] Measures R M 1988 *Laser Remote Chemical Analysis* (New York: John Wiley & Sons, Inc.) pp44-70
- [15] Hong G L, Zhang Y C, Zhao Y F, Shao S S, Tan K, Hu H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [洪光烈, 张寅超, 赵曰峰, 邵石生, 谭锟, 胡欢陵 2006 物理学报 **55** 983]
- [16] Nakajima T Y, Imai T, Uchino O, Nagai T 1999 *Appl. Opt.* **38** 5218
- [17] Camagni P, Colombo A, Koehler C, Omenetto N, Qi P, Rossi G 1991 *Appl. Opt.* **30** 26

Simulation of fluorescence lidar for detecting oil slick*

Jing Min¹⁾²⁾ Hua Deng-Xin^{1)†} Le Jing¹⁾

1) (School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

2) (School of Mechanical engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

(Received 23 December 2015; revised manuscript received 22 January 2016)

Abstract

In order to measure the oil pollution on water surface, a fluorescence lidar model system based on laser induced fluorescence is put forward for detecting oil slick. The system model and fluorescence detecting principle are described in detail. According to the properties of detected material, wavelength of laser and filter of receiving system are adopted to ensure that the lidar system is operated at the peak wavelength. Following the development trend of miniaturization in the world, using single laser and intensified charge-coupled devices, a small fluorescence detecting system is designed. FTSS 350-50 laser made by CRYLAS company, with compact dimension, low weight and excellent energy efficiency, and PI-MAX4 intensified charge-couple devices made by Princeton Instruments company, with good time resolution characteristic, are selected to produce laser as a launch device and to inspect fluorescence lifetime and capture image as a receiving device, respectively. The laser excitation wavelength, the energy of laser, the center wavelength and bandwidth of filter, the received echo fluorescence signals, the detected concentration and distance are discussed in detail by means of the instance for oil on water surface. Through analyzing the relationship between the energy of laser single pulse and the detection concentration and by combining with the parameters of fluorescence lidar system and fluorescence lidar equation, the detecting ability of system model, signal-to-noise ratio, etc. are simulated particularly. A numerical simulation of the signal-to-noise ratio of the fluorescence particles is conducted particularly so that the detectable capacity of system designed could be described better. The results show that the signal-noise ratio of system which is operated during the night is superior to in daytime in the same single pulse energy case and that the detected range becomes gradually longer as the energy of laser improves with the same signal-noise ratio case. The required single pulse energy to support system is calculated, and further verifies the feasibility of the lidar system. The test results of the sample show that in the daytime, the design of fluorescence lidar model, with a Nd:YAG laser of 50 μ J single pulse energy and 355 nm wavelength serving as an excitation light source, with a collection device placed at a distance of 7 m, can satisfy the requirements for detecting oil pollution on the water surface in laboratory, and its signal-noise ratio can reach 10. In view of the actual surface fluorescence lidar detection requirements, the method of increasing the laser power is proposed. A real system with 50 mJ single pulse energy at a distance of 230 m has nearly the same performance as the laboratory lidar system, which could provide a valuable guidance for designing a real system.

Keywords: laser induced fluorescence, fluorescence lidar, oil slick, signal-to-noise ratio

PACS: 07.60.-j, 42.68.Wt, 02.60.Cb

DOI: [10.7498/aps.65.070704](https://doi.org/10.7498/aps.65.070704)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275185).

† Corresponding author. E-mail: xauthdx@163.com