

沙氏激光雷达探测水体衰减系数

刘子凡, 车昊, 官振峰, 刘琨, 梅亮*

大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024

摘要 根据沙氏成像原理,采用 450 nm 高功率二极管激光器作为光源,CMOS 图像传感器作为探测器,研制了一种水体沙氏激光雷达,并利用该雷达系统实现了动态水体衰减系数测量。针对空气-玻璃-水体交界面的折射效应,对水体测量时的像素-距离关系进行修正。在实验室内,利用沙氏激光雷达系统对加入不同质量浓度脂肪乳 (Intralipid) 的水体进行探测研究,并利用斜率法及 Klett 法反演得到水体衰减系数。实验结果表明,沙氏激光雷达不仅可以捕捉水体动态变化过程,而且反演获得的水体衰减系数与加入的脂肪乳质量浓度具有良好的 consistency,证明了沙氏激光雷达用于水体衰减系数定量探测的可行性,为下一步开放水域测量提供了参考。

关键词 遥感; 沙氏激光雷达; 沙氏成像原理; 衰减系数; 二极管激光器; 水体探测

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1210003

1 引言

海洋、湖泊、江河等水体是生态系统的重要组成部分,其动态变化对全球气候环境变化及人类的生产生活等产生了重要影响。实现海洋水体环境的监测对海洋资源开发利用、海洋环境保护乃至全球气候变化等具有极其重要的意义^[1]。海洋光学参数如衰减系数等是海洋环境的重要指标之一,精确的海洋光学参数测量可为海色遥感、海洋碳循环研究及海洋初级生产力评估等提供重要的数据支持。

目前,海洋等水体光学参数探测主要通过原位测量、被动遥感及激光雷达等方式实现。原位测量技术是通过车载原位测量仪器实地测量获得数据,虽然测量精度较高,但测量效率较低、测量覆盖范围较小,难以满足复杂多变的水体环境探测需求^[2]。卫星水色遥感作为一种被动遥感方式,能够实现大面积水体的同步观测,但无法实现水体剖面数据的探测。此外,在探测小范围水域的水体光学参数时,其测量精度和分辨率均较低^[3]。作为一种主动遥感方式,激光雷达主要通过探测待测目标的散射回波信号的强度、频率等信息来获取目标的特征参数^[4-5]。早在 20 世纪 60 年代,激光雷达技术就被应

用于海水深度测量,并逐渐成为海底地貌、水文勘测、渔业探测等应用的重要技术手段之一^[6-8]。近年来,激光雷达技术已逐渐应用于海洋叶绿素浓度、海洋散射层及光学衰减系数等的探测,并发挥着越来越重要的作用^[9-13]。目前,在水体光学参数探测领域应用的激光雷达主要是基于飞行时间原理的脉冲式激光雷达。脉冲激光雷达采用纳秒量级的脉冲光源和高灵敏度光电探测器,以时间分辨的方式实现不同距离(深度)的后向散射信号探测,可穿透水体表层,最终实现水体剖面光学参数的探测及反演。激光雷达应用于海洋等水体测量时,由于水体对光波吸收严重,探测深度或距离一般仅为几米至几十米。为了实现较高的距离分辨率和较大的探测深度,水体激光雷达技术对光源的脉冲能量、脉冲宽度及采样速率等都提出了较高的要求。

近年来,基于沙氏成像原理的新型沙氏激光雷达 (SLidar) 技术逐渐被应用于大气环境监测、燃烧诊断、农业生态等领域^[14-22]。该技术以二极管激光器作为光源、图像传感器作为探测器,通过角度分辨的方式实现距离分辨探测,极大地简化了激光雷达系统结构,并具有近距离探测盲区短、性价比高、维护成本低等特点。此外,沙氏激光雷达技术在短距离测量时具

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(62075025)、大连市高层次人才创新支持计划(2020RQ018)

通信作者: * meiliang@dlut.edu.cn

备厘米(甚至毫米)量级的空间分辨率,尤其适用于水体等短距离测量场景^[23]。2021 年,针对水体小角度后向散射测量问题,中国海洋大学研究小组搭建了水体沙氏激光雷达^[24-25],实现了对去离子水、自来水及河水的后向散射信号的初步探测与定性分析。

为了实现结构简单、低维护成本、高性价比的水体激光雷达探测技术,本文将沙氏激光雷达应用于水体探测,设计并搭建了小型化水体沙氏激光雷达系统,并对其在水体测量时的激光雷达方程进行了探讨和分析。在实验室条件下,将脂肪乳(Intralipid,英脱利匹特)作为散射物质加入自来水中,模拟水中悬浮颗粒。利用沙氏激光雷达系统对含有不同质量浓度脂肪乳的水体进行探测,通过斜率法及 Klett 法定量反演水体衰减系数,从而探讨沙氏激光雷达应用于水体衰减系数定量探测的可行性。

2 水体沙氏激光雷达的设计

2.1 水体沙氏激光雷达基本原理

沙氏激光雷达以沙氏成像原理为理论基础,采用二极管激光器作为光源,利用图像传感器探测回波信号。根据沙氏成像原理(图 1),当发射光束所在物面、图像传感器所在像面及透镜所在平面相交时,可对物面成清晰的像,并获得理论上的无穷远景深。当沙氏激光雷达应用于水体探测时,激光束经过不同环境介质,在交界面处会发生折射效应。由于系统测量是在实验室条件下进行,对水槽内水体进行探测时,激光束经过水槽玻璃窗口会发生折射现象。因此,在推导水体探测条件下探测距离与图像传感器像素的关系时,需要考虑空气-玻璃-水交界面的两次折射现象。根据沙氏成像原理^[15, 26]并利用几何光学推导,得到水体探测条件下探测距离与图像传感器像素的数学表达式为

$$z = \frac{\tan \gamma_1 L [p_1 (\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi) + L_{II}]}{\tan \gamma_2 [p_1 (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi) + L_{II} \tan \varphi]} - z_0 \left(\frac{\tan \gamma_1}{\tan \gamma_2} - 1 \right) + t \left(1 - \frac{\tan \gamma_3}{\tan \gamma_2} \right), \quad (1)$$

式中: z 表示测量距离; L 表示透镜中心与光束所在物面的间隔; p_1 表示任意像素单元到中心像素单元的位置; θ 表示像面与透镜面的夹角; φ 表示接收透镜光轴与激光束的夹角; L_{II} 表示相机接收平面中心与透镜中心的距离; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别表示激光束在介质交界面的入射角及折射角; z_0 为系统发射端到水槽的距离; t 为水槽玻璃窗口的厚度。将像素-距离关系式作微分,可得出距离分辨率与探测距离的

关系。不难发现,水体沙氏激光雷达的空间分辨率与距离平方成正比,即 $dz \propto z^2$ 。

水体沙氏激光雷达通过分析回波信号变化和求解激光雷达方程来获取探测目标的信息。结合上文中水体探测条件下的距离分辨率与距离的关系以及传统激光雷达方程,特定波长下的水体沙氏激光雷达方程为

$$P(z) = CP_0 \beta(z) \exp \left[-2 \int_{z_0}^z \alpha(z') dz' \right], \quad (2)$$

式中: C 为系统常数; P 、 P_0 分别表示系统探测的回波信号功率及系统发射功率; β 表示后向散射系数; α 表示激光雷达衰减系数。当激光雷达系统的视场较小时,激光雷达衰减系数可近似为水体衰减系数。由于激光束在空气中的传输距离较短,激光在空气中的衰减可忽略不计。由式(2)可知,探测的激光雷达回波信号不随距离平方的增大而衰减。

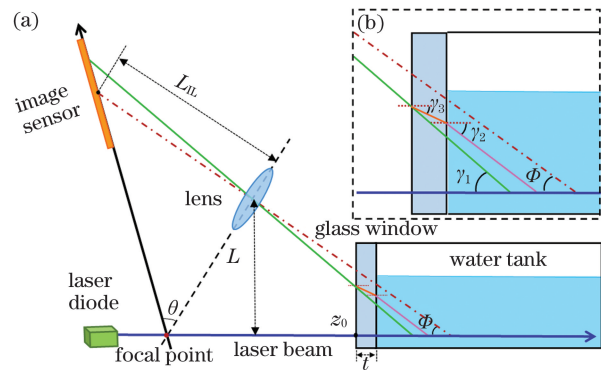


图 1 测量原理示意图。(a) 水体沙氏激光雷达原理;
(b) 光在交界面处的折射情况

Fig. 1 Schematic of measurement principle. (a) Schematic of Scheimpflug lidar in water bodies; (b) refraction of light at an interface

2.2 水体沙氏激光雷达系统

纯水在蓝绿光波段的吸收系数较低,因此现有脉冲式水体激光雷达大多采用常见的 486 nm 和 532 nm 激光作为探测光^[27]。沙氏激光雷达采用连续波二极管激光器作为光源,波长选择较为自由。由于在 450 nm 波段,二极管激光器的输出功率较高,有利于提升测量距离,再加上 450 nm 波段的纯水吸收系数较小,因此本实验采用 450 nm 波长的蓝光二极管激光器作为光源。水体沙氏激光雷达系统主要包括发射单元、接收单元和控制单元三个部分,系统结构如图 2 所示。发射单元主要由 450 nm 多模二极管激光器(0.8 W)和准直透镜构成,二极管激光器发射的光束经透镜准直为 15 mm 的光斑,并射入待测水体。激光光束在水体内将会被吸收和

散射,其后向散射光将由接收单元收集和探测。接收单元主要由接收透镜(焦距为 100 mm,口径为 25 mm)、滤光片和 CMOS 相机(Lumenera Lt225, 2048×1088, 5.5 μm×5.5 μm)构成。由激光束与水体相互作用产生的散射光经过接收透镜会聚后成像于 CMOS 相机。滤光片的中心波长为 450 nm,半峰全宽为 25 nm,可有效抑制背景杂散光。发射单元与接收单元的间隔约为 100 mm, CMOS 相机的倾角为 45°,因此系统结构满足沙氏成像原理。控制单元主要由计算机和调制电路板构成,通过 LabView 软件和调制电路板实现对系统运行的控制及数据的记录储存。测量过程中,二极管激光器实行强度调制, CMOS 相机可交替获取激光光束图像及背景图像,从而实现背景信号的实时测量及动态扣除。像素-距离关系曲线以及距离-分辨率曲线如图 3 所示。可以看到,当测量距离为 2 m 时,沙氏激光雷达系统的理论距离分辨率高达 1.5 mm,远优于现有的脉冲式水体激光雷达系统的距离分辨率。

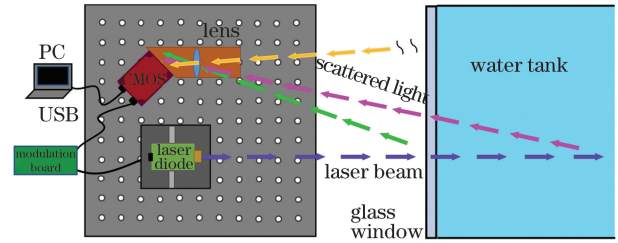


图 2 水体沙氏激光雷达系统原理及测量示意图,其中 CMOS 相机倾斜 45°放置

Fig. 2 Schematic of Scheimpflug lidar system for water-body measurements, and CMOS camera is tilted for 45°

为了更好地验证沙氏激光雷达系统的探测能力,设计加工了 1.5 m 长的小型水槽用于实验室内的定量化测量研究,同时将透过率较高的石英玻璃作为窗口。水槽由亚克力板制成,这种材质的表面透明且光滑,会导致光束进入水槽后产生杂散光,干扰系统的探测。针对这一问题,将黑色哑光布基胶带贴于水槽内部,利用其表面较为粗糙且不反光的特点,避免杂散光对探测结果的干扰。

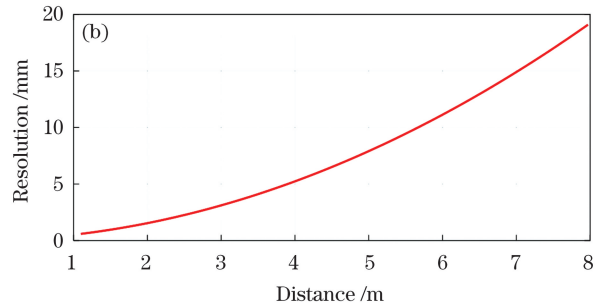
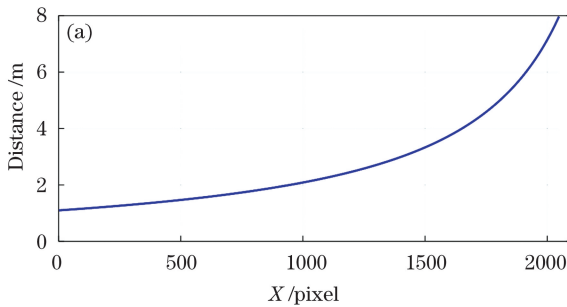


图 3 激光雷达系统测量距离及分辨率。(a)像素-距离关系曲线;(b)距离-距离分辨率关系曲线

Fig. 3 Measurement distance and range resolution of lidar system. (a) Relationship between pixel and distance; (b) relationship between measurement distance and range resolution

3 水体衰减系数探测

3.1 水体激光雷达信号测量

为了检验水体沙氏激光雷达系统结构及像素-距离关系,在实验室条件下进行了自来水的测量实验。图像传感器采用的曝光时间为 1000 ms,测量时光束在自来水中的回波信号成像在 CMOS 相机的感光区域上,如图 4(a)所示。对接收的回波信号进行纵向累加、背景信号扣除等处理后得到原始信号,如图 4(b)所示。进行像素-距离转换后,得到激光雷达信号的距离-强度曲线,如图 4(c)所示。图 4(b)、(c)中两处峰值为光束经过水槽前、后两玻璃窗时反射产生的光斑,这种强反射信号将会泄漏到周围的区域,从而对附近的回波信号产生影响,而两玻璃窗处光斑对应的距离之差即为水槽的长度。

因此,利用峰值的像素位置及像素-距离关系可计算出水槽长度。经过分析计算,得到的水槽长度为 1.52 m,与实际长度基本一致,验证了水体沙氏激光雷达的距离探测能力。

为了研究水体沙氏激光雷达的定量化探测能力,对自来水及加入脂肪乳溶液的自来水进行实验测量。脂肪乳又名英脱利匹特(Intralipid),为白色乳状液体,可作为一种能量补充药物为人体提供能量和必需的脂肪酸。脂肪乳具有良好的散射特性及均匀性,不同批次产品的性状稳定、重复性好,作为一种高散射、低吸收的标准颗粒物被广泛应用于生物光学等相关领域的科学研究^[28-32]。本实验所选用的脂肪乳溶液的质量浓度为 0.2 g/mL(生产企业:费森尤斯卡比华瑞制药有限公司)。向自来水中加入一定量的脂肪乳溶液,将会极大地增强待测水

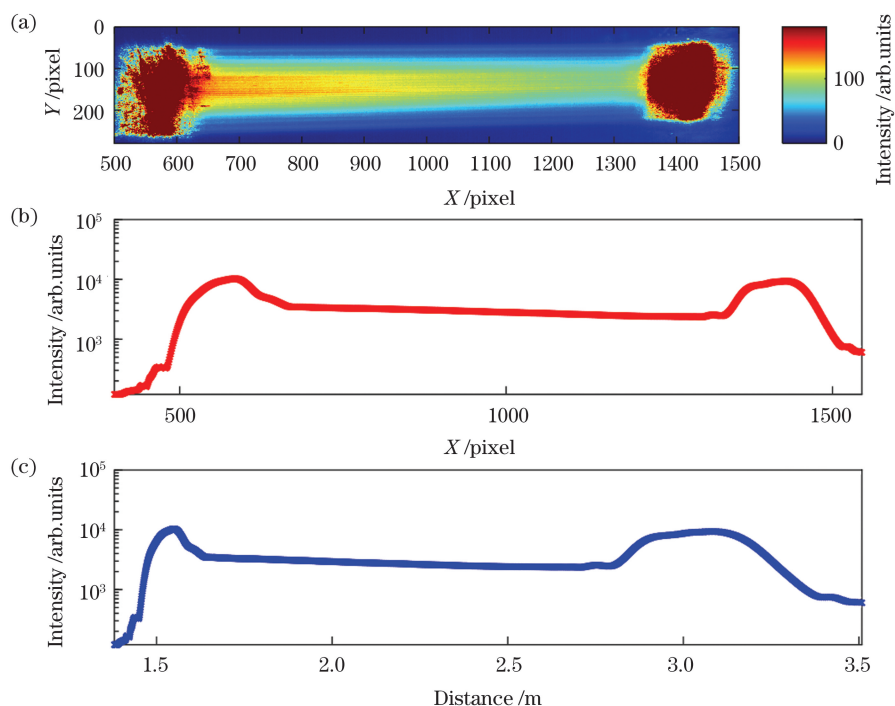


图 4 光束图像及激光雷达曲线。(a)自来水中激光光束成像效果示意图;(b)激光雷达信号的像素-强度曲线;(c)经过像素-距离转换后的激光雷达信号距离-强度曲线

Fig. 4 Image of laser beam and lidar profiles. (a) Schematic of imaging effect of transmitted laser beam in tap water; (b) pixel - intensity curve of lidar signal; (c) distance - intensity curve of lidar signal after pixel - distance transform

体对光的散射能力,水体光学特性随之发生变化。作为药用产品的脂肪乳溶液质量浓度较高,即使添加少量脂肪乳溶液到水槽,也会导致光束强度迅速衰减,从而降低系统探测距离。因此,实验过程中首先对 0.2 g/mL 质量浓度的脂肪乳溶液进行稀释,将其质量浓度稀释到 4 g/L。将一定的脂肪乳稀释溶液加到自来水中,可得到具有不同光学特性的待测水体。

实验过程中,首先测量自来水的激光雷达回声信号,系统曝光时间为 1000 ms。将连续测量的 20 条激光雷达曲线进行中值平均,进而获得单条激光雷达曲线。一段时间后,分别在 2021 年 12 月 24 日 10:45、

21:00 及 12 月 25 日 10:52、21:04 这 4 个时刻加入 1 mL 质量浓度为 4 g/L 的脂肪乳稀释溶液,并连续测量不同脂肪乳含量的水体激光雷达信号,此时系统的曝光时间调整为 200 ms。将加入 1 mL、2 mL、3 mL、4 mL 脂肪乳稀释液的自来水分别记为混合水 A、混合水 B、混合水 C、混合水 D。根据水槽内自来水及加入稀释液的体积,可计算出 4 种混合水中的脂肪乳质量浓度分别为 0.17 mg/L、0.35 mg/L、0.52 mg/L、0.69 mg/L。随着脂肪乳质量浓度的增大,水体对光的散射能力增强,激光衰减得更快,激光束在水中的传输距离变短。图5所示为2021年12月

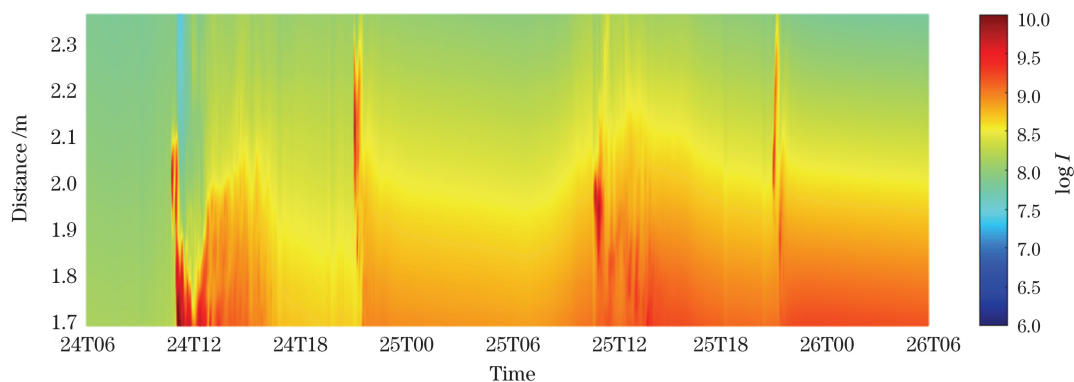


图 5 2021 年 12 月 24—26 日不同时刻测得的水体激光雷达信号强度的时空分布

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of water-body lidar signal measured at different time on December 24 - 26, 2021

23—26 日的连续测量结果,其中 I 为激光雷达信号的强度。由于脂肪乳溶液的散射能力较强,每次加入脂肪乳稀释溶液,激光雷达回波信号强度会骤增,经过一段时间,待脂肪乳稀释溶液充分溶于水后,水体重新回到稳定、均匀状态,回波信号也逐渐稳定。这一结果表明,沙氏激光雷达应用于水体测量时,能够捕捉到水体的动态变化过程。此外,相比于加入脂肪乳稀释溶液之前,每次加入脂肪乳稀释溶液后,激光雷达回波信号的强度会随着脂肪乳含量的增加而增强。图 6 所示为自来水及不同脂肪乳质量浓度混合水的激光雷达信号曲线。可以看出,随着脂肪乳质量浓度逐渐变大,水体对光的散射能力增强,近距离处回波信号的强度增大,回波信号的衰减速度也逐渐加快。

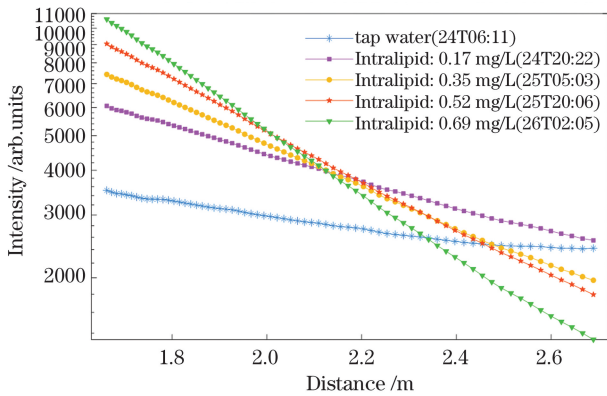


图 6 2021 年 12 月 24—26 日不同时刻测得的不同脂肪乳质量浓度下的激光雷达信号

Fig. 6 Range-resolved lidar signals with different mass concentrations of fat emulsion (Intralipid) measured at different time on December 24 - 26, 2021

3.2 水体衰减系数反演

利用激光雷达信号反演衰减系数在水体中的分布是获取水体光学参数的重要手段。反演水体衰减系数需要求解水体激光雷达方程。从式(2)不难看出

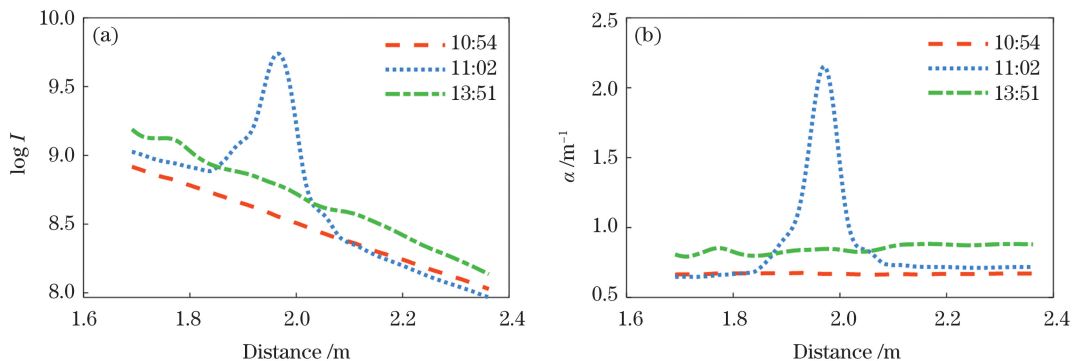


图 7 2021 年 12 月 25 日不同时刻测得的激光雷达信号曲线及反演结果。(a) 典型时刻的激光雷达信号;(b) Klett 法求解的衰减系数

Fig. 7 Lidar signal profiles and inversion results measured at different time on December 25, 2021. (a) Typical lidar signals; (b) attenuation coefficients retrieved by Klett method

出,激光雷达方程中存在两个未知数——衰减系数及后向散射系数。为了解决一个方程求解两个未知数的难题,本实验借鉴大气激光雷达方程的基本思路,分别采用 Klett 法和斜率法求解激光雷达方程,获得水体的衰减系数。

根据水体激光雷达回波信号的特点,在水体均匀稳定的情况下,在信号的有效距离内,水体在不同距离的衰减系数具有一致性,其激光雷达信号的对数近似为一条直线。此时,利用斜率法即可求解衰减系数。当加入脂肪乳稀释溶液后,水体处于不均匀状态,此时难以利用斜率法求解衰减系数。针对这一情况,可利用道格拉斯-普克算法对激光雷达信号曲线进行分割,从而获得一段线性区间^[26]。在此区间内,水体基本处于均匀状态,具有相同的衰减系数,由此可求解这一线性区间内的衰减系数。将这一衰减系数作为边界值,结合 Klett 法^[33],可求解不同距离处的水体衰减系数,即

$$\alpha(z) = \frac{P(z)}{\frac{P(z_c)}{\alpha(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} P(z') dz'}, \quad (3)$$

式中: $\alpha(z)$ 、 $P(z)$ 分别表示水体衰减系数和水体激光雷达回波信号强度; $\alpha(z_c)$ 为利用道格拉斯-普克算法求解的衰减系数边界值。将 $\alpha(z_c)$ 代入式(3)即可获得不同距离处的衰减系数。根据上述方法:一方面,可利用斜率法求解水体均匀状态时的衰减系数;另一方面,在激光雷达信号存在线性区间的情况下,可利用 Klett 法获取水体加入脂肪乳稀释溶液整个过程的衰减系数。第三次加入脂肪乳稀释溶液前后的激光雷达信号曲线及对应的 Klett 法反演结果如图 7 所示。不难看出,加入脂肪乳稀释液后,产生强回波信号,对应的衰减系数可达 2 m^{-1} 。随着脂肪乳的逐渐扩散,水体的衰减系数重新归于均匀分布。

图 8 为利用 Klett 法获取的回波信号衰减系数时空分布图。空白区间内,激光雷达信号波动剧烈,水体均匀性较差,难以评估衰减系数的边界值并利用 Klett 法进行反演。从图 8 可以看到,当加入脂肪乳以及脂肪乳逐渐扩散时,水体分布不均匀,衰减系数在不同距离处的波动较大。当加入

脂肪乳一段时间后,脂肪乳与水体充分混合,从利用 Klett 法获得的衰减系数时空分布图可知,不同距离的衰减系数基本一致,水体基本处于均匀状态。同时,对于含有不同质量浓度的脂肪乳水体,其衰减系数有一定差别,且脂肪乳质量浓度越高,衰减系数越大。

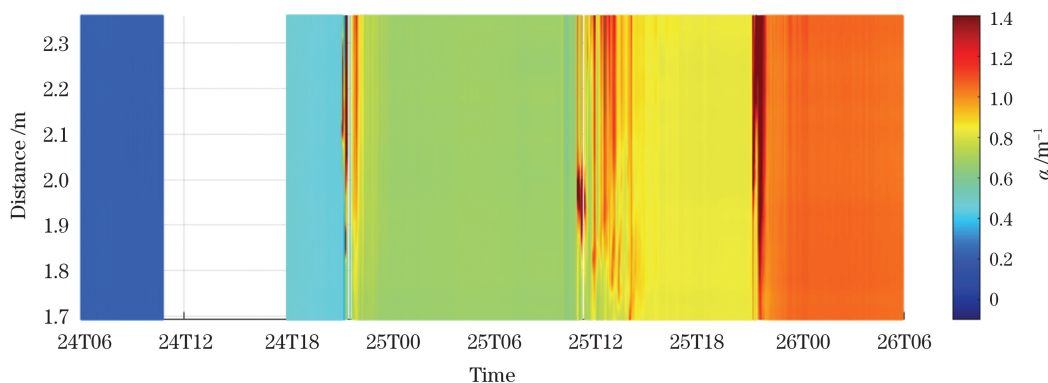


图 8 在 2021 年 12 月 24—26 日不同时刻利用 Klett 法测得的水体衰减系数时空分布图

Fig. 8 Temporal and spatial distribution of water attenuation coefficient obtained by Klett method at different time on December 24 - 26, 2021

为了验证斜率法和 Klett 法反演结果的可靠性,分别对两种方法反演的衰减系数进行统计分析。分别选取一段时间内自来水及加入脂肪乳稀释溶液后混合均匀的水体测量结果,求解衰减系数的平均值,并与脂肪乳质量浓度进行对比分析。水体衰减系数的平均值与脂肪乳质量浓度的关系如图 9 所示,其中不同质量浓度脂肪乳的水体衰减系数计算区间分别为:2021 年 12 月 24 日 6:00—10:38(自来水)、12 月 24 日 19:00—20:59(0.17 mg/L)、12 月 25 日 2:57—6:00(0.35 mg/L)、12 月 25 日 18:32—20:33(0.52 mg/L)、12 月 26 日 0:32—6:00(0.69 mg/L),自来水中不含脂肪乳,脂肪乳的

质量浓度为 0。从图 9 可以看到,随着脂肪乳质量浓度的升高,由 Klett 法和斜率法反演的衰减系数增大,而且两者之间具有非常好的一致性。同时,利用两种方法求得的衰减系数与脂肪乳质量浓度的相关系数均高达 0.997,证明了激光雷达探测以及反演结果的可靠性。

4 结 论

将沙氏激光雷达技术应用于水体探测,采用多模 450 nm 二极管激光器作为光源,CMOS 图像传感器作为探测器,并根据沙氏成像原理搭建了水体沙氏激光雷达系统。该系统具有探测盲区小、距离分辨率高、成本低的特点。此外,对水体探测条件下的沙氏激光雷达像素-距离关系进行推导修正。在实验室条件下,将脂肪乳(英脱利匹特)作为散射物质加入到自来水中,模拟水中悬浮颗粒。利用沙氏激光雷达系统对加入不同质量浓度脂肪乳的水体进行探测,通过斜率法及 Klett 法反演水体衰减系数。对水体激光雷达信号时空图的分析结果,证明沙氏激光雷达用于水体测量时可有效探测水体的动态变化过程。同时,反演获得的水体衰减系数与加入的脂肪乳质量浓度具有良好的一致性,初步证明了沙氏激光雷达应用于水体衰减系数探测的可行性,下一步将采用其他测量仪器对水体光学特性进行定标并开展不同仪器测量结果的对比研究。此外,进一步完善水体沙氏激光雷达系统的光机结构及反演算

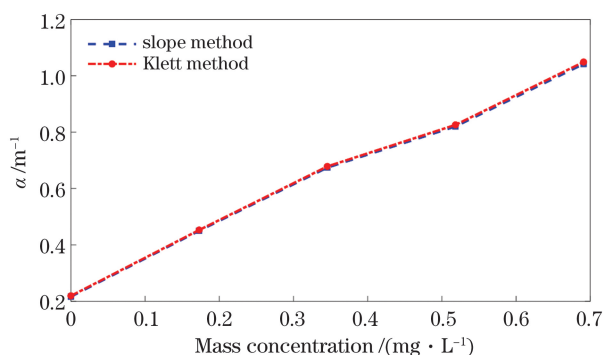


图 9 不同质量浓度脂肪乳情况下,根据斜率法和 Klett 法求解的光学衰减系数

Fig. 9 Relationship between Intralipid mass concentration and attenuation coefficient retrieved by slope method and Klett method

法,并利用系统对开放水体进行探测分析将是未来研究的重要方向。

参 考 文 献

- [1] Dickey T, Lewis M, Chang G. Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, 44(1): RG1001.
- [2] Smart J H, Kwon K H K. Comparisons between *in situ* and remote sensing estimates of diffuse attenuation profiles [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2964: 100-109.
- [3] 唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 460-500.
Tang J W, Chen G, Chen W B, et al. Three dimensional remote sensing for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 460-500.
- [4] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051405.
- [5] Lee J H, Churnside J H, Marchbanks R D, et al. Oceanographic lidar profiles compared with estimates from *in situ* optical measurements [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 786-794.
- [6] 胡善江, 贺岩, 臧华国, 等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果 [J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1163-1167.
Hu S J, He Y, Zang H G, et al. A new airborne laser bathymetry system and survey result [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1163-1167.
- [7] Hickman G D, Hogg J E. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1969, 1(1): 47-58.
- [8] 栾晓宁, 李菁文, 郭金家, 等. 海洋激光雷达在渔业资源调查和生态环境监测中的应用 [J]. *激光生物学报*, 2014, 23(6): 534-541.
Luan X N, Li J W, Guo J J, et al. Ocean lidar for fishery resources survey and ecological environment monitoring [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, 23(6): 534-541.
- [9] 刘志鹏, 刘东, 徐沛拓, 等. 海洋激光雷达反演水体光学参数 [J]. *遥感学报*, 2019, 23(5): 944-951.
Liu Z P, Liu D, Xu P T, et al. Retrieval of seawater optical properties with an oceanic lidar [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(5): 944-951.
- [10] 李志刚, 刘智深, 朱林伟. 一种激光雷达测量海洋光学参数的新方法 [J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 142-146.
Li Z G, Liu Z S, Zhu L W. New method for measuring ocean optical parameters by lidar [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 142-146.
- [11] Cecchi G, Lognoli D, Mochi I, et al. Lidar measurement of the attenuation coefficient of natural waters [C] // 22nd International Laser Radar Conference, May 20, 2004, Matera, Italy. Netherlands: Multisensory Research, 2004, 27(561): 827.
- [12] Churnside J H, Donaghay P L. Thin scattering layers observed by airborne lidar [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, 66(4): 778-789.
- [13] Vasilkov A P, Goldin Y A, Gureev B A, et al. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(24): 4353-4364.
- [14] Brydegaard M, Gebru A, Svanberg S. Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles: application to interacting flying insects (invited paper) [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 147: 141-151.
- [15] Mei L, Brydegaard M. Continuous-wave differential absorption lidar [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 629-636.
- [16] 梅亮, 孔政, 林宏泽, 等. 基于沙氏成像原理的激光雷达技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(3): 20210033.
Mei L, Kong Z, Lin H Z, et al. Recent advancements of the lidar technique based on the Scheimpflug imaging principle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210033.
- [17] Liu Z, Li L M, Li H, et al. Preliminary studies on atmospheric monitoring by employing a portable unmanned Mie-scattering scheimpflug lidar system [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 837.
- [18] Mei L, Kong Z, Ma T. Dual-wavelength Mie-scattering Scheimpflug lidar system developed for the studies of the aerosol extinction coefficient and the Ångström exponent [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31942-31956.
- [19] Kong Z, Liu Z, Zhang L S, et al. Atmospheric pollution monitoring in urban area by employing a 450-nm lidar system [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1880.
- [20] Mei L, Guan P, Yang Y, et al. Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A628-A638.
- [21] Lin H Z, Zhang Y, Mei L. Fluorescence Scheimpflug LiDAR developed for the three-dimension profiling of plants [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9269-9279.
- [22] Malmqvist E, Brydegaard M, Aldén M, et al.

- Scheimpflug lidar for combustion diagnostics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 14842-14858.
- [23] Chen K, Gao F, Chen X, et al. Overwater light-sheet Scheimpflug lidar system for an underwater three-dimensional profile bathymetry [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7643-7648.
- [24] 张元帅, 张洪玮, 吴松华. 测量小角度后向散射的水体沙氏激光雷达技术设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(11): 1101004.
- Zhang Y S, Zhang H W, Wu S H. Design of water scheimpflug lidar technology used for measuring small angle backscattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101004.
- [25] Zhang H W, Zhang Y S, Li Z W, et al. Small angle scattering intensity measurement by an improved ocean scheimpflug lidar system [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2390.
- [26] Mei L, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): A1613-A1628.
- [27] 李凯鹏, 贺岩, 侯春鹤, 等. 双波长海洋激光雷达探测近岸到大洋水体的叶绿素剖面 [J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2010002.
- Li K P, He Y, Hou C H, et al. Detection of chlorophyll profiles from coastal to oceanic water by dual-wavelength ocean lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2010002.
- [28] Mei L, Somesfalean G, Svanberg S. Frequency-modulated light scattering interferometry employed for optical properties and dynamics studies of turbid media [J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(8): 2810-2822.
- [29] Mei L, Svanberg S, Somesfalean G. Frequency-modulated light scattering in colloidal suspensions [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(6): 061104.
- [30] Ninni P D, Martelli F, Zaccanti G. Intralipid: towards a diffusive reference standard for optical tissue phantoms [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(2): N21-N28.
- [31] Driver I, Feather J W, King P R, et al. The optical properties of aqueous suspensions of Intralipid, a fat emulsion [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1989, 34(12): 1927-1930.
- [32] Giusto A, Saija R, Iati M A, et al. Optical properties of high-density dispersions of particles: application to intralipid solutions [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(21): 4375-4380.
- [33] Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(11): 1638-1643.

Development of Scheimpflug Lidar Technique for Measuring Attenuation Coefficient of Water Body

Liu Zifan, Che Hao, Gong Zhenfeng, Liu Kun, Mei Liang*

School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of China, Dalian 116024, Liaoning, China

Abstract

Objective Optical parameters such as the attenuation coefficient are important environmental indicators of water bodies, including ocean, lakes, and rivers. The accurate measurement of the optical parameters of water bodies is crucial for ocean color remote sensing, ocean carbon cycle research, and ocean primary productivity assessment. Recently, the lidar technology has been gradually employed in the measurements of the marine chlorophyll concentration, scattering layer, optical attenuation coefficient, etc. However, the currently available lidar technique is mainly based on the time-of-flight principle, putting high demands on the laser energy, laser pulse width, and signal sampling rate to achieve large-depth and high-spatial-resolution measurements. In this work, we have designed and developed a Scheimpflug lidar (SLidar) system based on the Scheimpflug imaging principle (Fig. 1) for attenuation coefficient measurements in water bodies. The SLidar technique features a high range resolution, low cost, low maintenance, and wide wavelength selectivity, which can provide a novel approach for the quantitative detection of the water-body attenuation coefficient.

Methods The water-body SLidar system (Fig. 2) mainly includes three parts: transmitting, receiving, and control units. The transmitting unit comprises a 450 nm multimode laser diode and a collimating lens. The 15-mm collimated laser beam is transmitted into a water tank. The backscattered light is collected using a receiving lens and then

detected using a 45° tilted CMOS camera with an interference filter for ambient light rejection. The distance between the transmitting and receiving units is ~ 100 mm to satisfy the Scheimpflug principle. During measurements, the laser diode is on-off modulated and synchronized with the exposure of the CMOS camera, which alternately acquires the laser beam image and the background image. Thus, the dynamic subtraction of the background signal is achieved. In addition, the pixel-distance relation (Fig. 3) in water-body measurements is evaluated by considering the refraction effect at air-glass-water interfaces. The SLidar system is utilized to measure the attenuation coefficient of water bodies in a laboratory with different mass concentrations of fat emulsion (Intralipid). The slope method and Klett method are used to quantitatively retrieve the attenuation coefficient of the water body.

Results and Discussions A water-body experiment is conducted under laboratory conditions. The transmitted laser beam in tap water is imaged using a CMOS camera. After pixel binning, background subtraction, and pixel-distance transformation, the range-resolved lidar profile is obtained (Fig. 4). Experiments with different mass concentrations of the fat emulsion are performed to examine the performance of the SLidar system. The fat emulsion solution with a mass concentration of 0.2 g/mL is diluted to 4 g/L, which is then added to the tap water to simulate different optical properties of the water body. During the measurement, the lidar signal is continuously recorded (Fig. 5), while the diluted fat emulsion (4 mL in total) is subsequently added to the water tank four times. The mass concentrations of the fat emulsion in the mixed water are then calculated, i. e., 0.17, 0.35, 0.52, and 0.69 mg/L. As shown in Fig. 6, the water body becomes inhomogeneous after adding the fat emulsion. Moreover, as the mass concentration of fat emulsion increases, the intensity of the lidar signal at a close distance first increases but then decreases rapidly. The attenuation coefficient profile is obtained using the Klett method (Fig. 7). The attenuation coefficient fluctuates significantly after the addition of the fat emulsion. As the fat emulsion and water body are fully mixed, the water body is almost homogeneous and the attenuation coefficients obtained using the Klett method at different distances are nearly the same. Furthermore, the attenuation coefficient of the water body generally increases with increasing mass concentration of fat emulsion (Fig. 8). The mean value of the attenuation coefficient under homogeneous conditions is evaluated. With an increase in the mass concentration of fat emulsion, the attenuation coefficients inverted using the Klett method and slope method increase correspondingly (Fig. 9). In addition, the correlation coefficient between the attenuation coefficient and mass concentration of fat emulsion reaches up to 0.997, successfully proving the reliability of the measurement result.

Conclusions In this work, we design and develop a SLidar technique based on the Scheimpflug imaging principle for attenuation coefficient measurements in water bodies by utilizing a 450 nm laser diode as the light source and a CMOS image sensor as the detector. In addition, the pixel-distance relation in water-body measurements is calibrated by considering the refraction effect at air-glass-water interfaces. The SLidar system is used for water-body investigations in a laboratory with different mass concentrations of fat emulsion, and the slope method and Klett method are employed to retrieve the attenuation coefficient of the water body. Experimental results show that the SLidar technique can capture the dynamic changes in the water body as well as retrieve the water attenuation coefficients, which are consistent with the concentrations of the added fat emulsion. These promising results successfully demonstrate the great feasibility of using the SLidar technique for quantitative water body measurements, paving a way for open-water measurements.

Key words remote sensing; Scheimpflug lidar; Scheimpflug imaging principle; attenuation coefficient; diode lasers; water body detection