

# 测量小角度后向散射的水体沙氏激光雷达技术设计

张元帅<sup>1,2</sup>, 张洪玮<sup>1,2\*</sup>, 吴松华<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

<sup>2</sup> 中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;

<sup>3</sup> 中国海洋大学海洋高等研究院, 山东 青岛 266100;

<sup>4</sup> 青岛海洋科学与技术试点国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237

**摘要** 针对水体小角度范围内后向散射强度测量难的问题, 基于沙氏成像原理设计了水体沙氏激光雷达系统。介绍了水体沙氏激光雷达系统的设计、模拟及搭建, 并对去离子水、自来水及河水三种水体进行水槽实验。详细介绍了多测量介质条件下的距离校正方法。将后向散射的光束宽度和强度变化情况与分光光度计测量数据进行比较, 发现激光光束的宽度及强度变化表征光束衰减情况, 同时可表征不同水体的后向散射强弱规律。分光光度计数据与水体沙氏激光雷达数据结果具有较好的一致性。

**关键词** 海洋光学; 后向散射强度测量; 水体沙氏激光雷达; 成像系统; 图像处理

中图分类号 TN958

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1101004

## Design of Water Scheimpflug Lidar Technology Used for Measuring Small Angle Backscattering

Zhang Yuanshuai<sup>1,2</sup>, Zhang Hongwei<sup>1,2\*</sup>, Wu Songhua<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

<sup>2</sup> Institute of Ocean Remote Sensing, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

<sup>3</sup> Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

<sup>4</sup> Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao, Shandong 266237, China

**Abstract** Herein, to address the challenge in measuring the small-angle backscattering intensity of water bodies, the water Scheimpflug lidar system was designed based on the Scheimpflug imaging principle. The design, simulation, and construction of this water Scheimpflug lidar were presented, and the flume experiments were conducted on deionized water, tap water, and river water. Moreover, the distance correction method under the condition of multi-measurement media was discussed in detail. The variations in width and intensity of the backscattered beam were compared with the measured data by the spectrophotometer. Results indicate that the width and intensity of a laser beam can represent the beam attenuation and simultaneously characterize the backscattered optical intensities in different water bodies. Furthermore, the data from the spectrophotometer have a good consistency with those from the water Scheimpflug lidar system.

**Key words** oceanic optics; backscattering intensity measurement; water Scheimpflug lidar; imaging system; image processing

**OCIS codes** 010.1350; 010.3640; 100.0100

## 1 引 言

光在海水中传播时, 散射是辐射传递模型中的最重要的过程之一。海洋水体小角度后向散射强度

的准确测量对海洋遥感研究具有重要意义, 而现有的测量手段很难实现小角度范围内的后向散射强度测量。随着对后向散射特性研究的逐步深入和测量技术的发展, 目前后向散射测量仪器主要分为多角

收稿日期: 2020-01-20; 修回日期: 2020-03-11; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400904)、国家自然科学基金青年基金(61901429)

\* E-mail: zhanghongwei8944@ouc.edu.cn

度后向散射测量和固定角度后向散射测量两种<sup>[1]</sup>。多角度后向散射测量仪器的原理是改变发射器和接收器的相对角度以完成不同角度后向散射系数的测量,目前主要有两种成型仪器,分别是多光谱体散射函数测量仪(MVSM)和固定波段多角度散射测量仪(MASCOT)。MVSM光源和接收器的位置固定,通过调整潜望棱镜的角度实现测量角度的变化,可测得多个波段、角度为 $0.6^{\circ}\sim 177.9^{\circ}$ 的散射光;MASCOT是一种固定波段、多角度的测量仪器,可测得某个固定波段、角度为 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 的散射回波信号<sup>[2]</sup>。目前后向散射测量仪器中能达到最大角度的是MVSM,为 $177.9^{\circ}$ ,但MVSM以机械转动的方式获取不同角度水体的体散射函数,测量效果较差<sup>[3]</sup>。另一方面,近似 $180^{\circ}$ 的小角度后向散射的测量仅仅是实验水平,并没有相关测量仪器直接测得数据,需要通过散射相函数建立散射模型,进一步求解才能得到小角度后向散射强度,且所得数据为模型计算值,并非实际测量值。

沙氏成像是一种通过特殊光学设置实现无限景深成像方式,可以实现较长的探测距离且清晰成像,目前广泛应用于昆虫学领域<sup>[4]</sup>、大气环境监测<sup>[5-8]</sup>、水生生物定量研究<sup>[9]</sup>。目前大多海洋激光雷达通过分析回波信号变化来获取探测目标的特征信息。通过海洋激光雷达衰减系数反演水体的吸收系数、衰减系数或漫射衰减系数,提取海水水体的光学特性参数<sup>[10-11]</sup>。目前对传统海洋激光雷达的研究较为成熟,海洋光学参数反演的数据算法较为完善,但传统海洋激光雷达大多需要高性能纳秒量级的脉冲光源,系统结构复杂、体积质量较大、成本较高、维护成本高。

本文从海洋科学应用出发,针对小角度后向散射现场测量的问题,基于沙氏成像原理,设计了水体沙氏激光雷达系统,并对系统进行了可行性分析及误差校正,完成三种典型水体介质 $175.5^{\circ}\sim 178.5^{\circ}$ 小角度后向散射强度测量。对水体沙氏激光雷达数据和分光光度计数据进行了比较分析,证明了本系统具有较好的水体划分能力,是现有后向散射测量设备很好的补充测量手段。

## 2 水体沙氏激光雷达探测原理

沙氏激光雷达应用了沙氏成像原理,当成像系统的物面与透镜平面不平行时,只要图像平面、物体平面及透镜平面三者相交于沙氏交点,就可以对物面清晰成像,并且成像系统具有无穷远景深的特点,如

图1所示。焦距则通过链式规则确定,即透镜前焦平面、物体平面及移至透镜中心的像平面须交于一点。

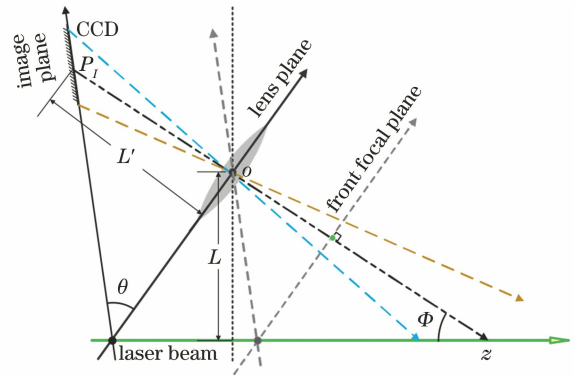


图1 沙氏成像原理图

Fig. 1 Schematic of Scheimpflug imaging

根据沙氏成像原理,图像传感器的像元序列与探测距离的关系可表示为

$$z = \frac{L[P_I(\sin\theta - \cos\theta \tan\Phi) + L']}{P_I(\cos\theta + \sin\theta \tan\Phi) + L' \tan\Phi}, \quad (1)$$

式中: $\theta$ 是图像平面向镜头平面的倾斜角; $\Phi$ 是透镜组的偏转角; $L$ 是透镜中心到激光束的距离; $P_I$ 是图像传感器中第 $I$ 个像素点与中心像素点的距离; $L'$ 是图像中心到透镜平面的距离。通过对距离分辨率进行微分,得到距离分辨率与探测距离的关系为

$$dz = \frac{z^2 \sin\theta(1 - \tan^2\Phi)}{[P_I(\sin\theta - \cos\theta \tan\Phi) + L']^2} dP_I. \quad (2)$$

同时,依据沙氏原理链式规则,可得到焦距公式为

$$f = \frac{L \tan\theta}{\tan\theta \sin\Phi + \cos\Phi}. \quad (3)$$

根据沙氏成像原理,系统参数 $(\theta, \Phi, L)$ 的变化影响着探测距离、距离分辨率、后向散射角度三个测量参数。通过系统参数之间的几何关系,根据不同测量对象及探测要求,可完成不同探测距离、不同距离分辨率、不同后向散射角度的测量。一般 $\theta$ 取 $45^{\circ}$ ,这样可兼顾近场和远场数据,为最佳角度。当 $\theta$ 大于 $45^{\circ}$ 时,近场数据会有所损失,当 $\theta$ 小于 $45^{\circ}$ 时,会损失远场数据。当 $L$ 或 $\theta$ 变大时,所探测的最近距离逐渐变大,探测范围变小。实验所用水槽的长度约为1.5 m,结合固体成像传感器(CMOS)参数,经多次计算分析,得出以下最优参数:透镜中心到激光束距离 $L$ 为0.105 m,透镜组的偏转角 $\Phi$ 为 $3^{\circ}$ ,图像平面向镜头平面倾斜角 $\theta$ 为 $45^{\circ}$ 。图2为相机像素点与测量参数之间的关系,可知测量距离范围为1.31~4.54 m,焦距为100 mm,距离分辨率最小为0.36 mm,最大4.8 mm,探测角度为 $175.5^{\circ}\sim 178.5^{\circ}$ ,角度分辨率最小为72 mrad,最大为81 mrad。

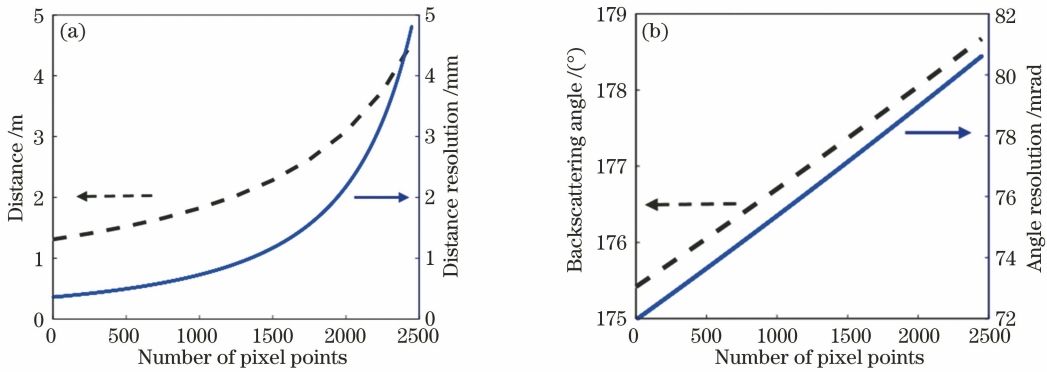


图 2 测量参数之间的关系。(a)相机像素点与测量距离和距离分辨率之间的关系;(b)相机像素点与后向散射角度和角度分辨率之间的关系

Fig. 2 Relationship among measurement parameters. (a) Relationship of camera pixel points with measurement distance and distance resolution; (b) relationship of camera pixel points with backscattering angle and angle resolution

水体沙氏激光雷达的工作原理与普通雷达类似,即由发射系统发送一个信号,信号与目标作用后产生的返回信号被接收系统收集并处理,以获得所需信息。由激光器发出一束波长为  $\lambda$  的激光束,经准直扩束后垂直射入探测对象,激光在通过水体时会散射和衰减,其后向散射光被接收系统接收,在距离  $z$  处的后向散射信号可用雷达方程表示为

$$P_s(\lambda, z) = P_0(\lambda) \times C \times \frac{O(z)dz}{z^2} \times \beta(\lambda, z) \times \exp\left[-2\int_0^z \alpha(\lambda, z')dz'\right], \quad (4)$$

式中:  $P_s(\lambda, z)$  是接收到的散射信号能量;  $P_0(\lambda)$  是初始激光束能量;  $O(z)$  是几何重叠因子;  $C$  是常数;  $\beta(\lambda, z)$  是后向散射系数;  $\alpha(\cdot)$  是衰减系数。沙氏雷达技术在信号处理方面具有独特优势,将(2)式代入(4)式中,则(4)式中  $1/z^2$  项被约掉了。当使用 CMOS 相机接收图像时,整个激光束在接收视场中可以对物体成像且不被截断,所以测量范围内重叠

因子  $O(z)$  为 1。因此沙氏激光雷达方程<sup>[12]</sup>可以简化为

$$P(\lambda, z) = K \times \beta(\lambda, z) \times \exp\left[-2\int_0^z \alpha(\lambda, z')dz'\right], \quad (5)$$

式中:  $K$  是系统常数。由于(4)式中  $1/z^2$  项被约掉,激光雷达回波信号不随  $z^2$  衰减,因此极大地降低了系统对测量动态范围的要求,使得系统结构紧凑、成本低。

在摄影或者成像时,当拍摄具有一定景深的图像时会产生弥散圆,即物点成像时,由于像差,其成像光束不能会聚于一点,会在像平面上形成一个扩散的圆形投影,如图 3 所示。

针对单一像元,要防止出现过大的弥散圆,需要对景深(depth-of-field)进行计算,比较像素点景深与像素点距离分辨率。若距离分辨率大于景深,则产生的弥散圆大于像素点,则此像素点距离分辨率

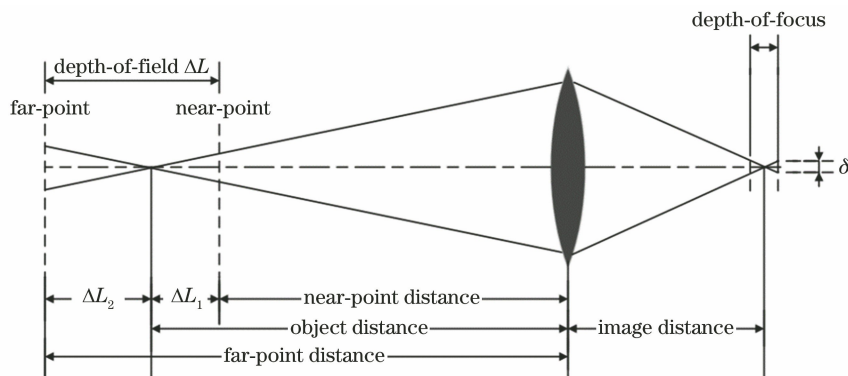


图 3 弥散圆示意图

Fig. 3 Schematic of diffusion circle

数据会对其他像素点数据的接收产生串扰。也就是说,当弥散圆直径超过单个像素点的大小时,其相邻的像素点也会接收这部分景深的信息,从而影响其他像素点信息的获取。景深与弥散圆的关系为

$$L_d = (L' + P_I \sin \theta) + \left( \frac{L}{\sin \Phi} - z_I \cos \Phi \right), \quad (6)$$

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{2^2 N \delta L_d^2}{N^4 - F^2 \delta^2 L_d^2}, \quad (7)$$

式中: $z_I$ 为第  $I$  像素点与中心像素点对应的探测距离之差; $\delta$ 为弥散圆直径(即像素点尺寸); $N$ 为镜头焦距; $F$ 为镜头拍摄光圈值; $L_d$ 为对焦距离; $\Delta L$ 为景深; $\Delta L_1$ 和 $\Delta L_2$ 分别为前景深和背景深。

将像素点直径假设为弥散圆直径,根据(6)式可以求出对应的景深变化。对单个像素点对应的景深和对应的距离分辨率进行比较,如图4所示,每个像素点的景深均大于像素点对应的距离分辨率,符合假设要求。经过原理及相关参数计算,设计的探测距离、距离分辨率参数均符合要求。

### 3 系统介绍与实验

#### 3.1 系统搭建与定标

水体沙氏激光雷达系统使用 CMOS 科研级相机(CS505 CU, THORLABS 公司),分辨率为

2448 pixel×2048 pixel,传感器尺寸为 8.4456 mm×7.0656 mm,位深为 12 bit。激光器为半导体泵浦固体连续激光器(瑞典 Cobolt 公司),激光波长为 532 nm。透镜是焦距为 100 mm 的镀膜双胶合透镜。滤光片的中心波长为(532±2) nm。在透镜和滤光片后加入一个光阑来对入射光场进行限制。根据所得参数和器件,完成系统的搭建。通过在探测范围内不同位置设置硬靶,结合第2节中理论计算值,完成对器件位置的校正。整个系统如图5所示,所用水槽长为 1.5 m,像素点范围为1~1600。水槽前端有直径为 8 cm,厚度为 4 mm 的圆形玻璃窗口。

光通过玻璃和水槽时会发生折射,需要进行实验定标。激光束通过玻璃窗口进入水体会发生两次

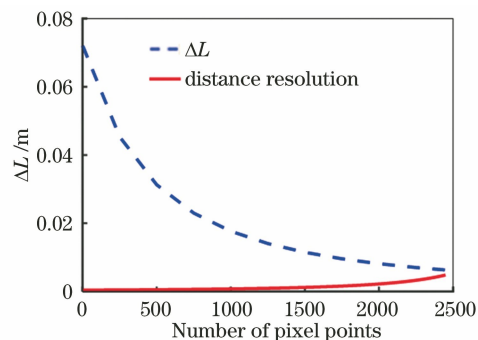


图4 像素点的景深和距离分辨率的关系  
Fig. 4 Relationship between depth-of-field and distance resolution of pixel points

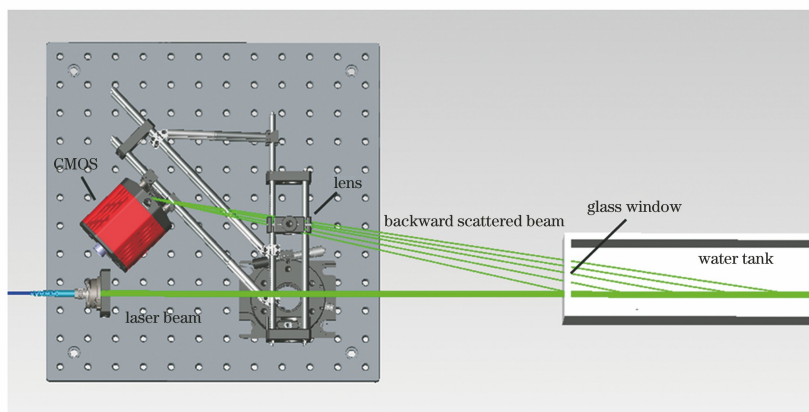


图5 实验系统示意图  
Fig. 5 Schematic of experimental system

折射,分别为玻璃折射和水体折射,如图6(a)所示,其中,虚线为光束理论传播路径。将水槽注满清水,在不同距离处设置硬靶目标,找到对应像素点并进行标记,如图6(b)圆点所示,实线为不考虑折射情况时像素与距离的关系曲线。假设玻璃折

射率  $n_2$  为 1.54,水的折射率  $n_3$  为 1.33,在考虑折射率及系统位置关系情况下,计算得到像素点与系统理论探测距离关系的曲线,如图6(b)虚线所示,通过比较,考虑折射影响计算所得结果与硬靶测量值结果一致。

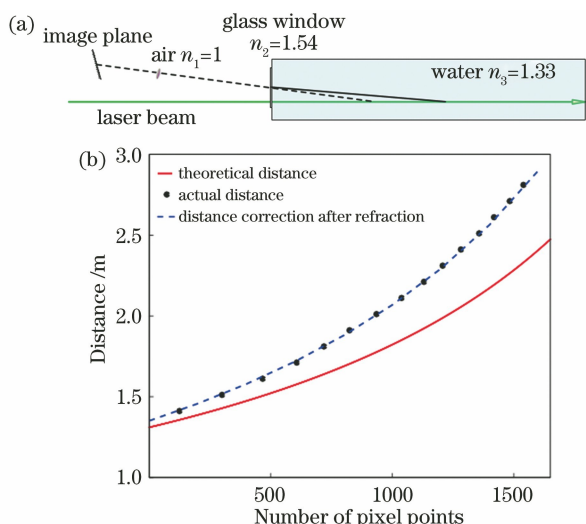


图 6 光束折射与探测距离关系。(a) 光线折射示意图；  
(b) 像素点与探测距离关系

Fig. 6 Relationship between beam refraction and detection distance. (a) Schematic of light refraction; (b) relationship between pixel points and detection distance

### 3.2 图像质量控制

水体沙氏激光雷达系统需要对得到的图像数据进行一定的质量控制,排除奇异点引起的数据误判,从而减小数据测量误差。依据多次测试结果,选取中心处  $400 \text{ pixel} \times 2400 \text{ pixel}$  区域为有效数据区域,以减少数据存储量。

CMOS 相机的曝光时间影响接收数据的信噪比。如果曝光时间不足,则图像信噪比过低,无法显示图像中的细节信息;曝光时间越长,到达 CMOS 相机表面的光子越多,采集到的图像具有更好的信噪比;但是曝光时间过长,图像接受光子达到饱和,此时受 CMOS 相机色彩分辨能力的限制,图像失去细节。通过改变曝光时间,对去离子水、自来水、河水等多种水体进行测量并比较,再选取合适的曝光时间进行后续测量。

利用水体沙氏激光雷达对自来水进行观测,连续拍摄 100 张图像,曝光时间设为 1, 5, 10, 14 s, 结果如图 7 所示。

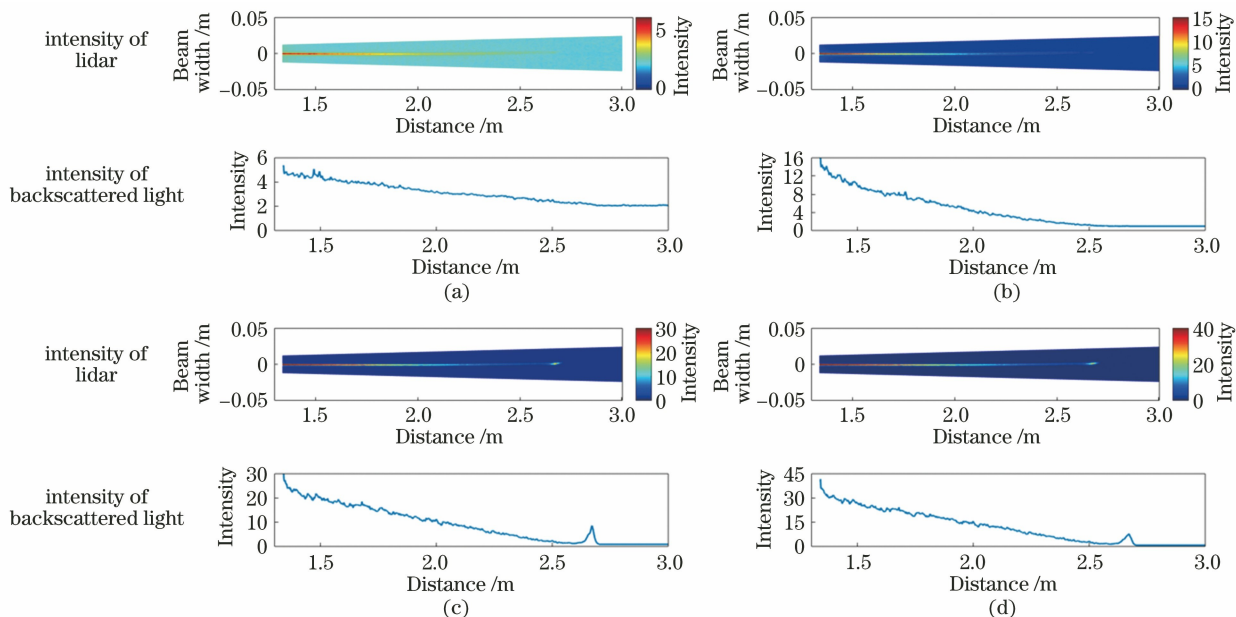


图 7 以自来水为介质,不同曝光时间下的水体沙氏激光雷达光强图和后向散射光强曲线。  
(a) 1 s; (b) 5 s; (c) 10 s; (d) 14 s

Fig. 7 Intensity curves of water Scheimpflug lidar and intensity curves of backscattered light with different exposure time when tap water used as medium. (a) 1 s; (b) 5 s; (c) 10 s; (d) 14 s

由图 7 可知,随着曝光时间的增加,后向散射光强度逐渐增强;在  $1.3 \sim 2.7 \text{ m}$  整个探测范围内,随着探测距离的增加,激光光束强度和宽度不断衰减,在  $2.5 \text{ m}$  处下降到了一个较低水平,此时在  $2.6 \text{ m}$  处出现的光点(剖面图中右侧的小峰)为远端的水槽壁;曝光时间为 10 s 和 14 s 时图像差别较小,后向散射光强度剖面相差不大,故选择曝光时间为 10 s

进行不同的实验。

## 4 实验结果分析和讨论

### 4.1 曝光时间为 10 s 时不同水体的长时间序列图

利用水体沙氏激光雷达系统,对不同水体(衰减系数不同)进行多次实验。图 8 为利用去离子水、自来水及河水作为测量介质得到的散射回波信号时间

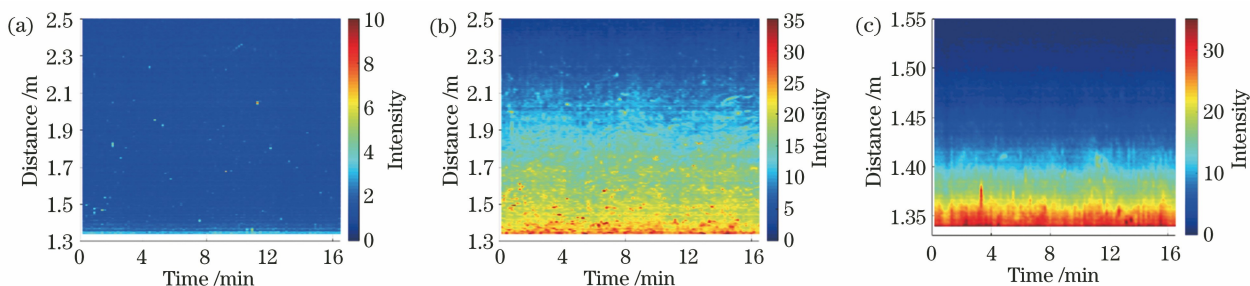


图 8 不同测量介质的散射信号强度。(a)去离子水;(b)自来水;(c)河水

Fig. 8 Scattered signal intensities of different measurement media. (a) Deionized water; (b) tap water; (c) river water

序列图。

从图 8 可知,不同水体的散射信号强度随探测距离增加明显递减。去离子水和自来水水质较为清澈,激光束可以穿透整个水槽,穿透距离达 1.2 m,由于去离子水中几乎没有散射颗粒,因而其信号强度较弱;而河水中含有多种藻类、泥沙等散射物质,对激光光束的散射能力较强且衰减能力较强,激光光束穿透距离仅为 0.2 m。通过分析时间序列图中光束穿透距离的变化可知,本实验过程中水体环境较稳定,水中微粒均匀,水体无明显扰动,这为利用激光光束宽度信息分析水体衰减提供了可能。此外在时间序列图中,散射信号的奇异值主要是由水体中较大粒径的粒子的后向散射强度明显高于周围水体散射强度引起的,该信息后续可用于粒子成像和粒子测速研究,本文不作详细处理。

#### 4.2 曝光时间为 10 s 时不同水体的光束宽度分析

图 9 为去离子水、自来水及河水三种水体测量所得的光束宽度图,水槽窗口玻璃折射引起光束宽度在测量距离为 2 m 处略有弯曲,这对光束宽度计算影响较小,可忽略不计。三种水体的后向散射强度、光束宽度变化各不相同,对数据进行降噪、拟合等预处理后,分析了光束宽度随探测距离增加的衰减情况,并对强度衰减结果和分光光度计测量结果进行了对比分析。

对激光传输方向的横向数据进行分析得到激光光束宽度,具体处理过程如图 10 所示。每帧图像数据的有效区域约为  $400 \text{ pixel} \times 1400 \text{ pixel}$ ,对每列 400 pixel 点数据进行归一化处理,并进行高斯函数拟合;根据实测数据与拟合高斯曲线的方差调整高斯曲线参数,通过迭代拟合得到方差较小的高斯曲线,将强度值  $1/e$  处的间隔记为激光光束宽度;对 1400 行数据进行处理,得到单幅图像光束宽度数据,并对 100 幅图像的光束宽度求平均值和标准差,

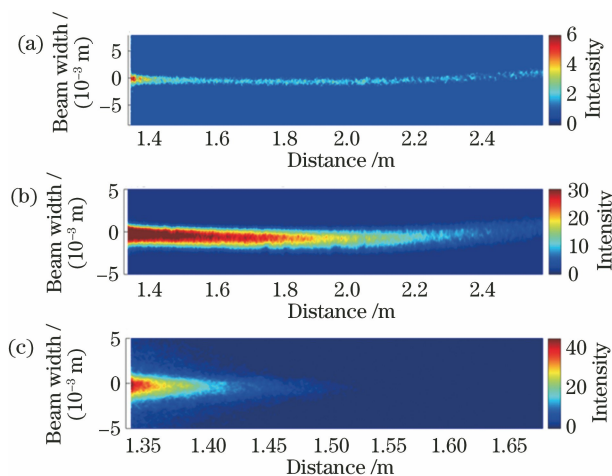


图 9 三种水体测量所得的光束宽度图。

(a)去离子水;(b)自来水;(c)河水

Fig. 9 Beam width diagrams obtained from three water body measurements. (a) Deionized water; (b) tap water; (c) river water

得到光束宽度变化图像,如图 11 所示。

不同水体中激光光束宽度均随测量距离增大而逐渐减小。不同光束的初始宽度不同,河水初始宽度大于自来水,自来水初始宽度大于去离子水;随测量距离增大,宽度衰减速度不同,河水宽度衰减速度大于自来水,自来水宽度衰减速度大于去离子水。去离子水体中几乎没有大颗粒散射物质,初始光束宽度约为 1.5 mm,且光束宽度衰减速度较慢,经过 1.2 m 光程的衰减,其光束宽度约为 1 mm;自来水虽经初步过滤和沉淀,但仍含有溶解矿物质和微米量级悬浮颗粒物,其光束初始宽度大于去离子水,约为 2.3 mm,其光束宽度衰减速率要大于去离子水,经过 1.2 m 光程的衰减,其光束宽度约为 1 mm;河水含有大量藻类及悬浮大颗粒物,由于多重散射作用的存在,其初始光束宽度明显大于去离子水和自来水,约为 3 mm,且激光光束在河水中衰减速率较大,仅能穿透水体约 0.2 m。

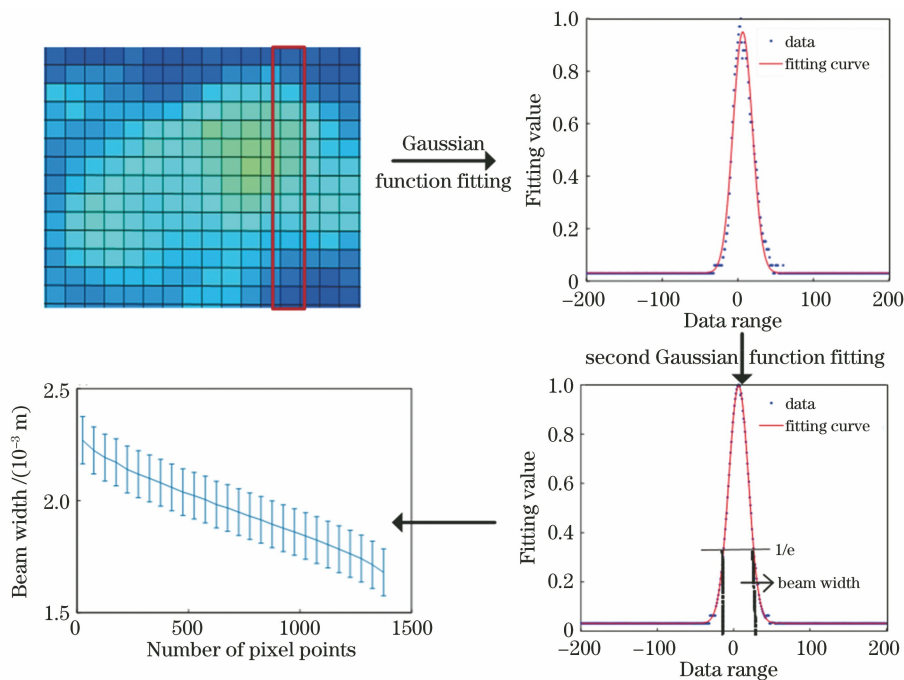


图 10 光束宽度数据处理流程图

Fig. 10 Flowchart of laser beam width data processing

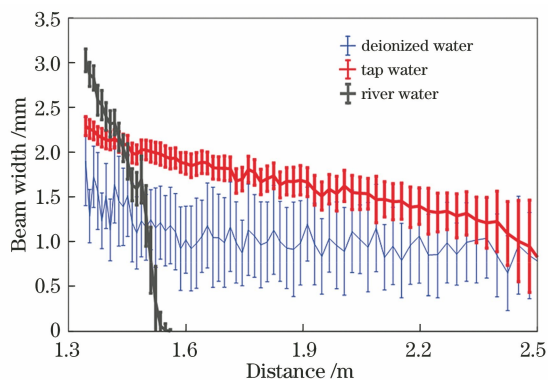


图 11 三种不同水体中光束宽度值及标准差随测量距离的变化情况

Fig. 11 Laser beam width and its standard deviation versus measurement distance for three different water bodies

图 12 为三种不同水体光束初始宽度、光束宽度衰减速率及散射光强度衰减速率的散点图。激光光束在不同水体中的初始宽度差别明显,去离子水和自来水中光束初始宽度较为接近,且有小部分数据重合,光束初始宽度的平均值为 0.4 mm;河水由于悬浮颗粒物较多,其多重散射作用明显,其光束初始宽度最大,平均值为 3.2 mm。光束宽度在不同的水体中有数量级的差距,在图中可以准确地将三种水体分离开。光束强度衰减率可以将三种水体分离开,但去离子水和自来水中的光束强度衰减率比较接近,可能因为激光光束在两种水体中的衰减率较

为接近。综上所述,水质影响着激光光束的初始宽度、宽度衰减率及强度衰减率。水体中悬浮颗粒越少,光束的初始宽度越窄,光束宽度衰减率和光束强度衰减率越小,反之当水体中悬浮颗粒物越多时,光的多重散射作用越明显,光束初始宽度衰减率和光束强度衰减率就越大。本系统的图像传感器的视场角范围为 27.6~29.2 mrad,根据激光雷达方程可推测,本系统获得的水体散射系数和吸收系数可表征激光光束在水体中的衰减情况。

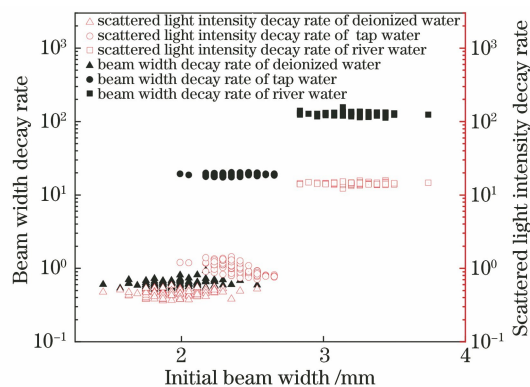


图 12 三种不同水体中光束初始宽度、光束宽度衰减速率及散射光强度衰减速率的散点图

Fig. 12 Scatter plots of initial beam width, beam width decay rate, and scattered light intensity decay rate for three different water bodies

为探究不同水体中激光光束宽度衰减率和强度

衰减率之间的关系,利用分光光度计(日立 U-3900H)对实验所用水体进行测量,分别测量三种水体的吸光度(吸收光密度)和吸收系数。在三种不同水体中分别取体积为 100 mL 的样品进行过滤(孔径为  $0.7\ \mu\text{m}$  的 GF/F<sup>TM</sup> 滤膜),每种水体完成三组

滤膜实验,滤膜外观如图 13 所示。利用另一清洁湿润的滤膜为参考对分光光度计进行标定,完成三种水体的分光光度计光谱测量,对同一水体多组数据求平均,得到不同水体的吸光度与吸收系数,如表 1 所示。

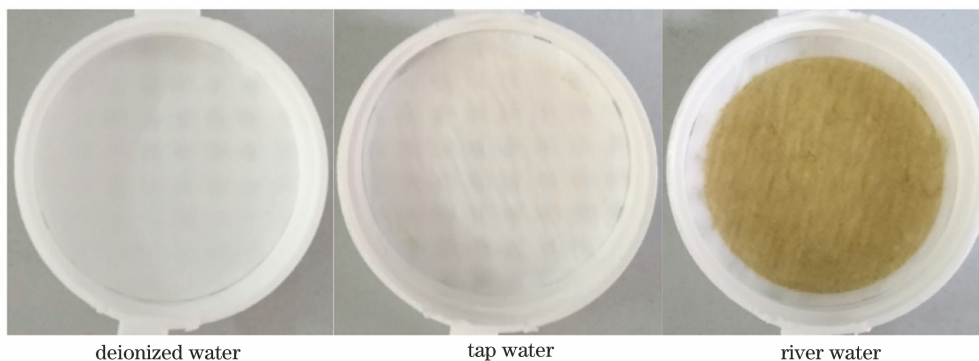


图 13 三种水体经过滤所得的滤膜

Fig. 13 Filter membranes obtained from filtration for three different water bodies

表 1 分光光度计与水体沙氏雷达数据结果比较

Table 1 Comparison of data from spectrophotometer and water Scheimpflug lidar

| Water           | Spectrophotometer |  | Water Scheimpflug lidar                 |  |
|-----------------|-------------------|--|---|--|
|                 | Absorbance        | Absorption coefficient / $\text{m}^{-1}$ | Beam width decay rate / $\text{m}^{-1}$ | Scattered light intensity decay rate / $\text{m}^{-1}$ |
| Deionized water | 0.0027            | 0.158                                    | 0.463                                   | 0.618  |
| Tap water       | 0.0052            | 1.243                                    | 1.014                                   | 18.866   |
| River water     | 0.2346            | 24.182                                   | 14.302                                  | 126.741  |

通过分光光度计处理得到的吸光度和吸收系数与光束宽度衰减率之间具有较高的一致性,去离子水、自来水、河水的吸收系数分别是 0.158、1.243、24.182,数值上约为 1 个数量级的差异。水体沙氏激光雷达的光束宽度衰减率与吸收系数尽管在数量级上保持一致,但动态范围更大,对不同水体的区分效果更好。散射强度衰减率的数据动态范围最大,去离子水与河水相差 4 个数量级以上,不同水体差别明显,因此可采用散射强度衰减率对相似水体进行分析。综上,吸收系数能够准确地表征不同水体的浑浊程度和水质情况,光束宽度衰减可表征在穿透路径上的吸收和散射的损耗,两类数据结果呈现了较好的一致性,散射强度衰减率的动态范围更大,更有利于对水体的划分。

## 5 结 论

不同于传统海洋激光雷达系统采用脉冲时序区分不同探测距离,水体沙氏雷达系统采用倾斜安置的光学传感器阵列,获得激光光束在水体中的二维

强度信号,提供了一种能测量激光后向散射强度的新方法。基于水槽实验对去离子水、自来水及河水三种水体的后向散射强度进行测量,并对激光光束宽度衰减率、光束强度衰减率与分光光度计测量吸收系数进行比较,结果具有较好的一致性。水体沙氏雷达系统所测的后向散射角度为  $175.5^\circ \sim 178.5^\circ$ 。通过水槽实验证明,基于沙氏成像原理的光学测量技术为海洋水体小角度后向散射强度的测量提供了可能。综合前期米散射模型仿真结果和本实验中激光光束的光程长度(后向散射角度范围较小),本文在提取后向散射强度值时未进行散射角度校正,而在后向散射角度较大、悬浮颗粒物浓度较大的测量环境下应考虑后向散射角度不同而引起的散射效率不同的问题。

后续研究工作中将对 I 类海水、II 类海水进行测量,针对不同粒径尺寸的藻类开展相关测量,研究光束宽度与水体类型或藻类浓度之间的关系。

致谢 感谢中国海洋大学信息科学与工程学院陈树



果老师和张国辉同学等在现场光学实验工作中的帮助及支持。感谢中国海洋大学水产学院梁英老师和闫译允同学在实验室藻类培养上的大力帮助。感谢中国海洋大学激光雷达课题组全体成员在实验中的支持和帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Shi S W, Wang J A, Jiang X Z, et al. A new measurement study of attenuation coefficient using multi-angle backscattering signals [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 417-420.  
石晟玮, 王江安, 蒋兴舟, 等. 海水衰减系数的多角度后向散射测量技术研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(5): 417-420.
- [2] Jiang L L, Zhao D Z, Wang L, et al. Methods and research progress on backscattering coefficient in the water [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(1): 150-156.  
姜玲玲, 赵冬至, 王林, 等. 水体后向散射特性研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(1): 150-156.
- [3] Li C, Cao W X, Ke T C, et al. Progress in measurement techniques of volume scattering function of the ocean[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(5): 65-72.  
李彩, 曹文熙, 柯天存, 等. 水体体散射函数测量技术研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(5): 65-72.
- [4] Malmqvist E, Brydegaard M. Applications of kHz-CW lidar in ecological entomology[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 25016.
- [5] Mei L, Brydegaard M. Development of a Scheimpflug lidar system for atmospheric aerosol monitoring[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 27005.
- [6] Yang, Guan P, Mei L. A scanning Scheimpflug lidar system developed for urban pollution monitoring[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 176: 01013.
- [7] Mei L, Guan P. Development of an atmospheric polarization Scheimpflug lidar system based on a time-division multiplexing scheme [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3562-3565.
- [8] 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.
- [9] Zhao G Y, Ljungholm M, Malmqvist E, et al. Inelastic hyperspectral lidar for profiling aquatic ecosystems[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 807-813.
- [10] Montes M A, Churnside J, Lee Z, et al. Relationships between water attenuation coefficients derived from active and passive remote sensing: a case study from two coastal environments [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2990-2999.
- [11] 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.
- [12] Liang M, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): A1613-A1628.