

# 基于遮光效应的海水折射率测量实验研究

李楠 陈琦峰 李玉松 李颖

中国海洋大学信息学院, 山东 青岛 266100

**摘要** 光束穿过液体时会在其与空气的界面处发生全反射产生遮光效应, 形成圆状的遮光图样, 其半径与液体折射率相关。依据遮光效应原理, 以氦氖激光器为光源, 搭建海水折射率测量实验装置, 改进了定标方法并利用高分辨率的单反相机采集海水的遮光效应图样。通过 MATLAB 编程对遮光图样进行数字图像处理反演海水的折射率, 实验中还测量了不同温度下海水的折射率, 得到海水折射率与温度变化基本呈线性关系。研究结果表明, 本实验方法易于实现, 重复性好, 测量精度较高, 应用于海水折射率测量是可行的。

**关键字** 光学测量; 遮光效应; 海水折射率; 温度

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP51.121202

## Experimental Investigation of Seawater Refractive Index Based on Shading Effect

Li Nan Chen Qifeng Li Yusong Li Ying

College of Information, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

**Abstract** When a light beam passes through the liquid, there will be a shading effect for the total reflection at the interface between the liquid and the air, which can be formed into a round shading pattern, and the radius of the shading pattern is concerned with the liquid refractive index. Based on this principle, a device of measuring seawater refractive index is established with He-Ne gas laser as the light source, and the shading pattern is detected by a digital camera with high resolution. The refractive index of seawater is calculated by MATLAB digital image processing program. Furthermore, the relation between the refractive index and the temperature is investigated, the results indicate that there is a linear relationship between seawater refractive index and change of the temperature. Research results show that the method is characterized by its easy achievement, good repeatability and high measurement precision, the application of seawater refractive index measurement is feasible.

**Key words** optical measurement; shading effect; seawater refractive index; temperature

**OCIS codes** 120.5700; 080.2740; 240.0310; 140.4130

## 1 引言

折射率是表征光透明物质光学性质的基本物理量之一, 在各种光透明介质中, 诸如密度、浓度、温度、应力等物理量的变化, 均会引起折射率的相应变化。海水折射率作为衡量海水物理、化学性质一个重要指标, 对研究海洋动力学及海气相互作用有重大意义, 同时也有助于海洋环境与气候监测、海洋能源开发、海洋渔业发展及海防建设等。目前对液体折射率的测量有诸多方法, 如迈克耳孙干涉法<sup>[1]</sup>、毛细管成像法<sup>[2-3]</sup>、衍射光栅法<sup>[4]</sup>、基于多模干涉和长周期光纤光栅法<sup>[5]</sup>、液芯变焦柱透镜法<sup>[6]</sup>等。迈克耳孙干涉法是测量折射率的传统方法, 但仅限于薄透明体, 且在测量过程中待测样品和测量光路需反复调整, 手工操作强度大, 测量过程时间较长; 毛细管成像法是目前测量微量液体的一种比较精确的方法, 但实验装置搭建复杂。遮光效应法是随着物质表面波性质的研究和发展, 基于遮光效应理论而建立起的一种新型折射率测量方法<sup>[7-9]</sup>, 不仅可

收稿日期: 2014-05-04; 收到修改稿日期: 2014-06-03; 网络出版日期: 2014-11-12

基金项目: 中国海洋大学本科生研究发展计划(1312010212)

作者简介: 李楠(1993-), 男, 本科生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: 15376792206@163.com

导师简介: 李颖(1971-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学测量与激光光谱学等方面的研究。

E-mail: liying@ouc.edu.cn(通信联系人)

以测量液体折射率还可以测量固体材料的折射率。本文依据遮光效应原理,以氦氖激光器为光源,搭建海水折射率测量实验装置,利用高像素的单反相机采集海水的遮光效应图样。通过 MATLAB 编程对遮光图样进行数字图像处理反演海水的折射率,并研究温度对海水折射率的影响。

## 2 遮光效应原理

设平面  $a$ 、 $b$  之间充满折射率为  $n_1$  的待测液体,高度为  $H$ ,液体上方为空气,折射率为  $n$ ,  $n_1 > n$ 。若光束由  $O$  处入射并以球面波传播,部分光在液体和空气的界面处发生全反射而不能穿过液体的上界面,这种现象称为遮光效应,原理示意图如图 1 所示。

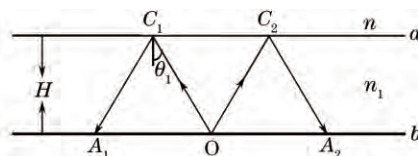


图 1 液体层遮光效应原理图

Fig.1 Schematic diagram of shading effect principle of liquid bulk

设光线  $OC_1$  与  $OC_2$  的入射角为全反射的临界角  $\theta_1$ , 则

$$\sin \theta_1 = \frac{n}{n_1}. \quad (1)$$

照射在  $C_1C_2$  区域外的光束因入射角大于  $\theta_1$  不能从液体上表面射出,同时在液体下表面与空气的界面处也发生全反射。 $C_1C_2$  区域内光束的入射角小于临界角,部分发生折射进入空气,部分反射回到液体下表面  $b$ ,继续反射与折射导致光强较弱,最终在  $A_1A_2$  区域内形成暗区,  $A_1A_2$  区域外形成亮区,这样的图样即为该液体的遮光图样,  $OA_1$  为遮光半径  $r$ 。由几何光学得

$$\sin \theta_1 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + 4H^2}}, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,有

$$r = \frac{2Hn}{\sqrt{n_1^2 - n^2}}, \quad (3)$$

$$n_1 = \frac{n\sqrt{r^2 + 4H^2}}{r}, \quad (4)$$

设蒸馏水的折射率为  $n_0$ ,  $r_0$  为其遮光半径,在实验中保证蒸馏水与待测液体的体积相同,可根据(4)式利用比较法消去  $H$  得出待测液体的折射率为

$$n_1 = \sqrt{n^2 + \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 (n_0^2 - n^2)}. \quad (5)$$

当光束照射在液体薄膜上时,其遮光效应原理示意图如图 2 所示。假设上下两块玻璃折射率相同且为  $n_2$ ,下层玻璃厚度为  $h$ ,两玻璃间为一层均匀的液体薄膜,折射率为  $n_1$ ,空气的折射率为  $n$ ,且满足  $n_2 > n_1 > n$ 。 $C'_1C'_2$  区域外的光束在下层玻璃的上表面与液体薄膜的下表面处发生全反射产生遮光效应,  $C'_1C'_2$  区域内的光入射角小于临界角,部分光经液体薄膜折射后进入上方的玻璃(忽略液体薄膜的厚度,可近似认为光线的入射点与出射点位置相同),最终在  $A'_1A'_2$  区域内形成暗区,  $A'_1A'_2$  区域外形成亮区,称这样的图样为液体薄膜的遮光图样,  $OA'_1$  为其遮光半径  $r'$ 。同理,光束在上层玻璃上表面与空气的界面处也发生全反射,在  $B_1B_2$  区

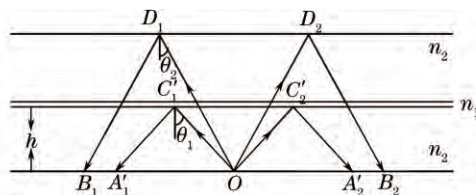


图 2 液体薄膜遮光效应原理图

Fig.2 Schematic diagram of shading effect principle of liquid film

域外形成亮区,  $B_1B_2$ 内形成暗区。由于  $\theta_1 > \theta_2$ , 为清晰观察到遮光图样, 上层玻璃不宜太薄以免内外层亮区的重叠。根据(1)式、(2)式, 有

$$r' = \frac{2hn_1}{\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}, \quad (6)$$

$$n_1 = \frac{n_2 r'}{\sqrt{r'^2 + 4h^2}}, \quad (7)$$

由(7)式可看出, 待测液体的折射率不仅与其遮光半径有关, 也与玻璃折射率有关。若玻璃折射率  $n_2$  未知, 可采用已知折射率的蒸馏水作为标准样品, 进行两次测量消去  $n_2$ , 得液体折射率为

$$n_1 = \frac{n_0 r' \sqrt{r_0'^2 + 4h^2}}{r_0' \sqrt{r'^2 + 4h^2}}, \quad (8)$$

(8)式中  $n_1$ 、 $r'$  分别为待测液体的折射率和遮光半径,  $n_0$ 、 $r_0'$  分别为蒸馏水的折射率和遮光半径。

### 3 实验装置

基于液体薄膜遮光效应原理, 设计并搭建实验装置如图3(a)所示。光源采用氦氖激光器, 激光通过直径为1 mm的光阑入射到厚度为2.78 mm的玻璃槽底层玻璃, 光阑的光孔覆盖白纸作为散射面。玻璃槽内为少量待测海水, 将一块玻璃盖片压在海水面上并缓慢移动消除其中的空气泡, 形成一层均匀的海水薄膜。激光在底层玻璃上表面与液体薄层的下表面处发生全反射产生遮光效应形成遮光图样, 玻璃槽上方放置基于APS画幅(23.5 mm×16.5 mm)CMOS的NikonD5200单反相机采集实验的遮光图样, 因拍摄环境为暗室, 在装置侧旁放置一个白色补光光源。为精确测量遮光半径的大小, 紧贴光阑面放置半径为5 cm的圆白板作为遮光图样的定标板, 定标板圆心与光阑圆心重合。在遮光图样采集过程中, 已知大小的定标板可与遮光图样一次成像, 保证了定标图样与遮光图样拍摄参数的完全一致性, 与其他定标方法相比, 不仅减少了实验流程, 还提高了测量精度。本实验中的海水样品为青岛近岸海水。

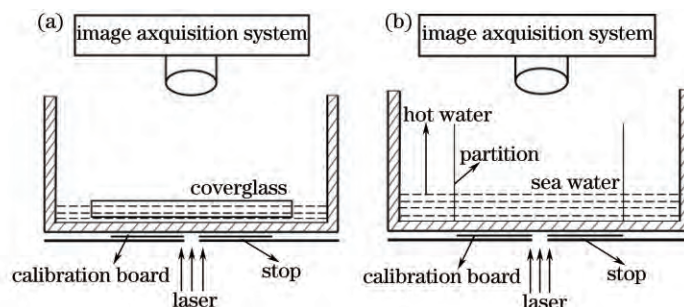


图3 实验装置示意图。(a) 海水薄膜; (b) 海水层

Fig.3 Schematic diagram of experimental setup. (a) Seawater thin film; (b) seawater bulk

温度是影响海水折射率的重要因素之一, 因此本实验进一步研究了海水折射率随温度的变化关系。考虑到图3(a)装置中海水较少, 加热时不便于对温度进行控制与测量, 去掉玻璃盖片, 加入两块薄隔板, 将装置改进为图3(b)所示。两隔板之间加入固定体积的待测海水, 隔板外侧加入热水, 待隔板内外液体达到热平衡时用数显温度计(JM624)监测实时水温, 每隔5℃采集一次遮光图样。

## 4 结果与分析

### 4.1 海水的遮光图样

首先, 对比分析了海水在氦氖激光和白光光源下的遮光图样, 如图4和图5所示。图4为激光光源下海水薄膜的遮光图样,  $OA_1'$  为图样的遮光半径, 由(6)式知玻璃槽底层玻璃越厚, 遮光半径越大, 最外层圆为定标圆, 根据定标圆的实际尺寸可标定遮光半径的大小。对比图4和图5可知白光光源虽无散斑效应<sup>[10]</sup>, 但白光发生全反射时光的色散会导致遮光图样明暗边界的加宽, 降低了图样的清晰度, 增加了数据处理的误

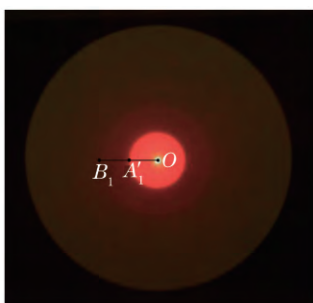


图4 激光光源下海水薄膜遮光图样

Fig.4 Shading pattern of seawater film under laser source

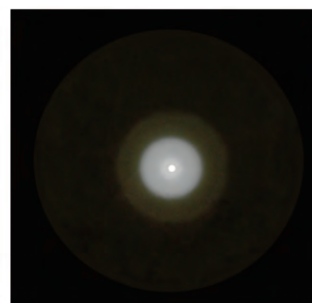


图5 白光源下海水薄膜遮光图样

Fig.5 Shading pattern of seawater film under white light source

差。而氦氖激光具有单色性好、亮度高等优点,散斑光强较弱,不影响图像的拍摄,得到的图像边缘清晰,因此实验采用氦氖激光器作为光源。

图6所示为海水层在激光光源下的遮光图样。考虑到实验中海水层相对于底层玻璃较厚,遮光半径较大,暂不考虑底层玻璃的影响,图中 $OA_1$ 为其遮光半径,由(4)式知海水层越厚,遮光半径越大。

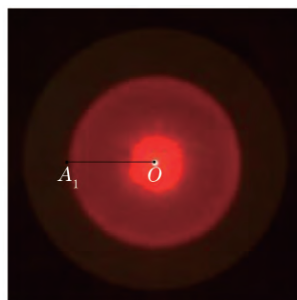


图6 激光光源下海水层遮光图样

Fig.6 Shading pattern of seawater bulk under laser source

#### 4.2 遮光半径计算

利用 MATLAB 编程实现对遮光图样的自动处理,首先通过图像的扫描获取图像 RGB 值随像素的变化关系,记录图中定标圆半径与遮光半径对应的像素差,再利用定标圆的实际尺寸便可计算遮光半径。以图4中海水薄膜遮光图样为例,读取图中每个像素点的 RGB 值,通过质心提取法检测图样的圆心位置,沿不同的直径方向扫描出多条 RGB 值与像素的关系曲线,图7给出了其中一条扫描结果。

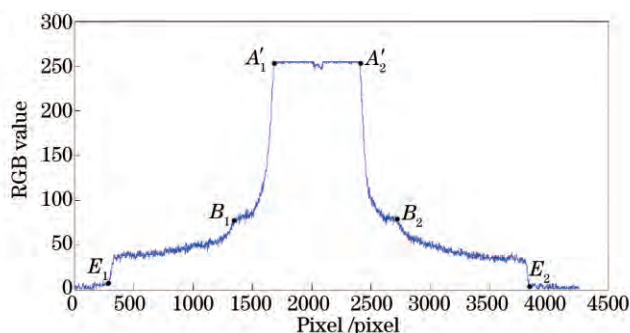


图7 RGB值与像素的关系曲线

Fig.7 Relation curve of RGB value and pixel

图7中横坐标为像素,纵坐标为对应的 RGB 值,RGB 值变化梯度最大的点即为图样的明暗边界点。 $A_1'A_2'$ 、 $E_1E_2$ 分别对应海水薄膜遮光图样与定标圆的直径,根据定标圆的实际半径 $R$ ,即可计算出遮光图样的半径。

#### 4.3 结果与分析

按照上述过程对海水薄膜遮光图样进行多次测量,利用数字图像处理得到遮光半径,再由(5)式计算出海水的折射率。表1记录了16℃下5次测量的结果。



表1 海水薄膜的遮光半径及折射率

Table 1 Shading radius and refractive index of seawater film

Number	Shading radius	Refractive index	Average value		Relative standard deviation	
	<i>r</i> /cm	<i>n</i>	<i>r</i> /cm	<i>n</i>	<i>r</i>	<i>n</i>
1	1.0464	1.34112				
2	1.0608	1.34164				
3	1.0554	1.34197	1.0517	1.34152	0.598 %	0.024 %
4	1.0494	1.34135				
5	1.0463	1.34143				

由表1测量结果可知,16 ℃下对青岛近岸海水折射率多次测量的平均值为1.3415,相对标准偏差为0.024%。文献报道常温下海水折射率约为1.34,且随着其他参数的变化有微小的波动<sup>[11]</sup>,因此对海水折射率的测量精度较高。

为研究本实验方法应用于海水折射率测量的可行性,利用图3(b)所示装置在不同温度下采集海水层的遮光图样,计算出相应的折射率,海水折射率随温度的变化关系曲线如图8所示。从图8可以看出,海水折射率随温度变化基本呈线性关系,线性拟合方程的斜率为-0.0002,截距为1.3445。该拟合结果表明,在0 ℃时海水折射率为1.3445,温度每升高1 ℃,海水折射率降低约 $2\times10^{-4}$ 。以上研究结果与文献报道的结果基本一致,说明该实验方法用于海水折射率测量是可行的。

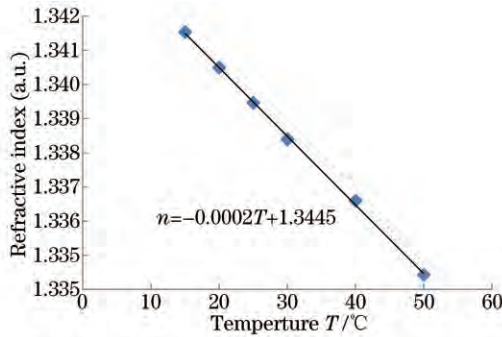


图8 海水折射率随温度的变化关系曲线  
Fig.8 Refractive index of seawater versus temperature

5 结 论

海水折射率作为衡量海水物理、化学性质的一个重要指标,对研究海洋动力学及海气相互作用等有重要意义。依据遮光效应原理,以氦氖激光器为光源,在实验室搭建了测量海水折射率的实验装置,改进了定标方法,利用单反相机采集海水的遮光效应图样,通过MATLAB编程对图样进行数字图像处理反演海水的折射率。16 ℃温度下多次测量海水折射率平均值为1.3415,相对标准偏差为0.024%。实验中还测量了不同温度下海水的折射率,结果表明海水折射率与温度变化呈线性关系。研究结果表明,该实验方法易于实现,重复性好,测量精度较高,应用于海水折射率测量是可行的。

参 考 文 献

1 Satya R Kachiraju, Don A Gregory. Determining the refractive index of liquids using a modified Michelson interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(8): 2361-2365.

2 Li Qiang, Wang Licun, Han Guanghui, *et al.*. Accurate measurement of micro liquid refractive index of capillary imaging [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1440-1446.

李 强,孙丽存,韩广辉,等.毛细管成像法精确测量微量液体的折射率[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(7): 1440-1446.

3 Li Yu, Li Qiang, Sun Licun, *et al.*. Measuring method for refractive index of micro- quantity liquid[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021202.

李 宇,李 强,孙丽存,等.测量微量液体折射率的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021202.

4 Xin Duqiang, Zhu Min, Xie Yanlei, *et al.*. Several methods of measuring liquid refractive index[J]. College Physics, 2007,

- 26(1): 34–37.
- 辛督强, 朱 民, 解延雷, 等. 测量液体折射率的几种方法[J]. 大学物理, 2007, 26(1): 34–37.
- 5 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905003.
- 王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905003.
- 6 Li Qiang, Sun Licun, Meng Weidong, *et al.*. Refractive index of liquid measured by liquid-core zoom cylindrical lens[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008005.
- 李 强, 孙丽存, 孟伟东, 等. 用液芯变焦柱透镜精确测量液体折射率[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008005.
- 7 Miao Runcai, Xu Guang, Lu Qieni. The distribution variation of reflection light field of the local curve surface[C]. SPIE, 1999, 3862: 68–70.
- 8 Miao Runcai, Zhu Jingtao, Yang Zongli. The effect of transmittance light obstructed by liquid surface and its application [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(4): 489–491.
- 苗润才, 朱京涛, 杨宗立. 液体表面的遮光效应及其应用[J]. 光子学报, 2002, 31(4): 489–491.
- 9 Miao Runcai, Gao Meiling, Han Pengbin, *et al.*. Light obstructing effect of liquid membrane[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 1101–1105.
- 苗润才, 高美玲, 韩鹏斌, 等. 液体薄膜遮光效应的研究[J]. 光子学报, 2011, 40(7): 1101–1105.
- 10 Li Lintao, Guo Fei, Yin Na, *et al.*. The experimental study of characteristics of laser speckle[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 31(1): 85–88.
- 李林涛, 郭 霏, 尹 娜, 等. 激光散斑特性的实验研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 85–88.
- 11 Austin R W, Halikas G. The Index of Refraction of Seawater[M]. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1976.