

# 图像传输方法测量海水的点扩展函数\*

于亦凡 陈维真 黄海龙 刘智深

(青岛海洋大学海洋遥感教育部重点实验室, 青岛 266003)

**摘 要** 海水水体的点扩展函数(PSF)及光学传递函数(OTF)描述了海水中光或图像传输的性质,是研究海水光学性质及水下图像系统的基本参数。探讨了用图像传输的理论测量海水点扩展函数或光学传递函数的方法,在实验室中建立了一套测量和计算系统;对不同长度的散射水体进行了测量,得到了一维和二维的海水点扩展函数曲线,测量结果与理论分析相符合。

**关键词** 点扩展函数, 光学传递函数, 光散射, 图像传输

## 1 引 言

海水中粒子对光的吸收、多次散射及强烈的前向散射,使光或图像在海水中传输的情况十分复杂。只有简单短距离的光传输可由海洋光学参数如衰减系数  $c$ 、吸收系数  $a$ 、散射系数  $b$  和体积散射函数  $\beta(\theta)$  进行分析<sup>[1]</sup>。多次散射占主导地位的长距离光传输情况,以前是用小角度近似和蒙特卡罗方法进行分析<sup>[2,3]</sup>。但它们一般是讨论大粒子浑浊介质,且仅考虑了前向散射光的影响,有一定的局限性。蒙特卡罗法还占用大量计算时间,而且已有的可用于蒙特卡罗模拟的  $\beta(\theta)$  数据也很少。为了在分析水下光传输问题时绕过这些困难,70年代起,不少研究者应用线性系统理论来讨论水中激光或图像的传输<sup>[4-6]</sup>。认为激光和图像在水中的传输,实质上是通过海水介质的光信息的传输过程。传输的结果,在空域可表示为输入图象分布与系统点扩展函数的卷积,在频域可表示为输入图象频谱与系统的光学传递函数的乘积。

对于整个水下图像系统,传递函数等于发射系统、水体和接收系统传递函数的乘积。因此,当发射系统和接收系统的传递函数已知时,得到水体扩展函数或光学传递函数,就可得到水中光或图像传输的结果。另一方面,水中光分辨率下降或图像的模糊,是因水体的点扩展函数或光学传递函数的存在<sup>[7]</sup>,有了点扩散函数和光学传递函数可对水中模糊图像进行复原;由点扩展函数和光学传递函数的数据还可计算海洋光学参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及水体中大粒子尺寸分布<sup>[4,7,8]</sup>。

Wells<sup>[2]</sup>提出,点扩展函数和光学传递函数可由小角度散射函数计算得到,但条件是前向散射光具有围绕非散射光的圆对称性和小角度近似。Grosso<sup>[9,10]</sup>用测量光学系统光学传递函数的方法测量海水的光学传递函数,精度高,但仪器复杂,设备昂贵,难以实用。刘智深等<sup>[11]</sup>根据海洋辐射传递的变换模型简捷地给出了可由海洋自然光场辐亮度分布计算海水光学传递函数的方法。Voss<sup>[12]</sup>提出用 CCD 为接收器的测量海水调制传递函数系统,操作简单,可得到有相当精度的结果。

\* 国家自然科学基金(49686006)、高等院校博士点专项科研基金(97042303)资助课题。

收稿日期:2000-02-25; 收到修改稿日期:2000-04-17

本文探讨了用图像传输的理论测量海水点扩展函数或光学传递函数的方法,并在实验室中建立了一套测量和计算点扩展函数及光学传递函数的系统。

## 2 原 理

根据线性系统理论,若水体系统的脉冲响应即点扩展函数为  $h(x, y)$ , 原始图像或光分布  $f(x, y)$  经水体传输之后得到的图像分布  $g(x, y)$  是原图像与水体点扩展函数的卷积, 表示为:

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') h(x - x', y - y') dx dy$$

或  $g = f \circledast h$ , (1)

其中  $\circledast$  表示卷积运算。点光源(即  $\delta$  函数)通过水体传输,由于水体的散射作用,得到一个点光源的模糊图像,此模糊图像即为水体的点扩展函数。此过程可表示为:

$$\text{PSF} = \delta(x, y) \circledast \text{PSF}.$$

因此,根据水中光或图像传输的概念,测量点光源经过水体后的光分布,可直接得到点扩展函数。但是点光源在实际中是很难得到的,此方法不具备实用性。若已知图像  $f_0(x, y)$  经水体传输后,得到模糊图像  $g_0(x, y)$ , 由(1)式进行退卷积运算,则可以得到水体点扩展函数。

将原图像与模糊图像数据分别进行二维傅里叶变换:

$$F_0(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f_0(x, y) \exp[-2\pi j(ux + vy)] dx dy,$$

$$G_0(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} g_0(x, y) \exp[-2\pi j(ux + vy)] dx dy,$$

由于图像在水中的传输过程,在空间频域可表示为

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v), \quad (2)$$

故可由

$$H(u, v) = \text{OTF} = G_0(u, v)/F_0(u, v) \quad (3)$$

求出水体的光学传递函数,而水体的调制传递函数  $\text{MTF} = |\text{OTF}|$ 。

本文根据图像传输的理论,采用狭缝作为原图像(因为狭缝容易得到,边缘尖锐,包含频率丰富,且噪声小),对狭缝图像通过水体传输的输出图像进行测量,由测量数据可计算水体的调制传递函数和点扩展函数。

## 3 实验及数据处理

水下图像采集与数据处理的实验系统如图1所示。系统由光源、水体、图像采集及数据处理三部分组成。光源是配有调压装置的250 W 碘钨灯,均匀漫射光斑尺寸为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , 光强可调;采用边缘尖锐的狭缝作为原图像,缝宽为  $1 \text{ mm}$ 。以上组件封装在光源箱内。水箱透光面尺寸  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ , 为均匀性及透光性良好的光学玻璃窗口。图像采集用 CCD 摄像机,加装可变焦镜头,焦距  $28 \sim 80 \text{ mm}$ ,  $f 3.9$ ; 所得图像经图像采集卡送入 PC 计算机;图像采集卡精度为 12 bit。为避免杂散光的影响,整个系统自光源箱至摄像机部分全部遮光。实验系统的角分辨率可由 CCD 像素分辨率计算得出,每一像素所对应的空间角为

$$\Delta\theta = \arctan(d/l_n),$$

其中  $d$  为 CCD 接收图像的像素分辨率,  $l$  为狭缝到摄像机透镜主平面光路总长度,  $n_w = 1.34$ 。计算结果为:  $\Delta\theta = 0.002^\circ$ 。

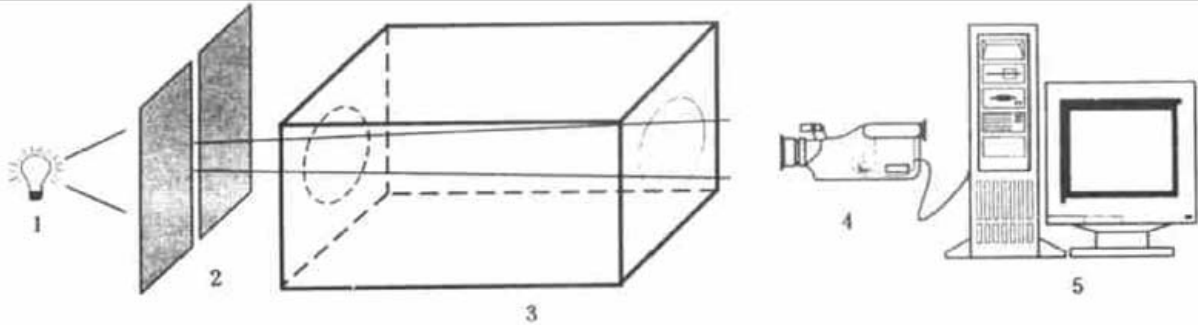


Fig. 1 Experimental setup

1: light source, 2: slit, 3: water tank, 4: CCD camera, 5: image A/D card and computer

水箱中无水时, 得到没有被散射的狭缝原图像为  $f(x, y)$ 。水箱中加入浑浊的散射水体后, 当散射水体长度分别为 10 cm、20 cm、30 cm 时, 分别拍摄到狭缝的模糊图像为  $g_{10}(x, y)$ 、 $g_{20}(x, y)$ 、 $g_{30}(x, y)$ 。在各种水体长度情况下, 重复采样 8 次, 以便观察其采样重复性的好坏, 并取平均以减小误差。实验中保持自狭缝至摄像机透镜主平面的光程不变, 这样所得图像视场不变, 数据的空间尺度不变。水体对光的传输有散射和吸收两方面的作用, 由狭缝在有水和无水时图像中心处光强的差别可求出水体的衰减, 本文只研究通过水体的图像传输性质, 因此通过增加光强来消除水体衰减的影响。

在 4 种水体长度情况下计算机所采集到的狭缝图像示于图 2。

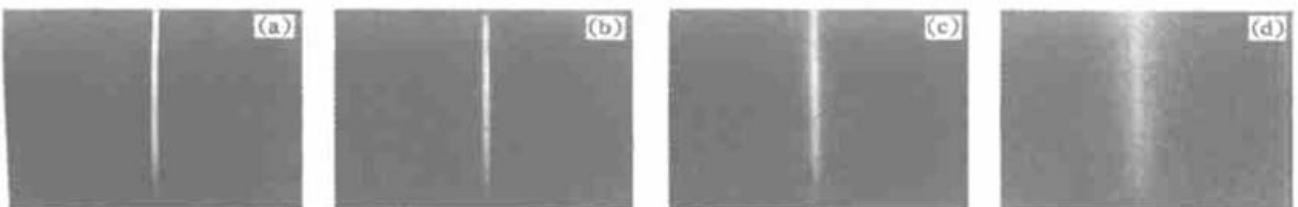


Fig. 2 Blurred image of the slit. (a) Original slit image; (b) Blurred image through 10 cm water path; (c) Blurred image through 20 cm water path; (d) Blurred image through 30 cm water path.

为消除边缘效应及一些误差因素, 在狭缝二维图像数据中部可取 200 行进行平均, 得到 4 组一维数据  $f_0(x)$ 、 $g_{10}(x)$ 、 $g_{20}(x)$ 、 $g_{30}(x)$ , 示于图 3。此数据反映不同散射水体长度, 狭缝图像产生不同的弥散。图中横坐标为像素数, 纵坐标为灰度级数据。自内向外的 4 条曲线分别对应于无水、10 cm、20 cm、30 cm 散射水体长度的狭缝图像的一维数据。

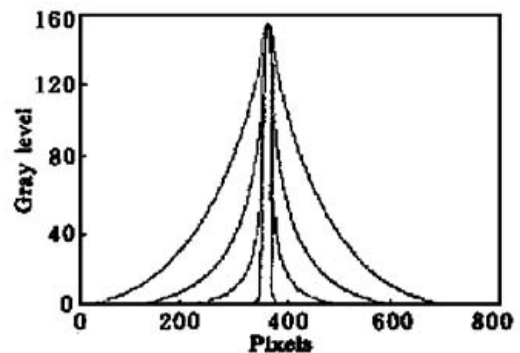


Fig. 3 1-D data of the slit images through different water path. The four curves from narrow to broad stands for  $f_0(x)$ ,  $g_{10}(x)$ ,  $g_{20}(x)$ ,  $g_{30}(x)$  respectively.

由  $g(x) = f(x) \circledast h(x)$ , 经过退卷积运算, 得到水体一维点扩展函数, 图 4 为水体一维点扩展函数的半宽度曲线, 可见随水体长度增加, 光弥散范围增加。

根据各向同性均匀水体点扩展函数圆对称的性质, 用数学方法求出二维点扩展函数, 不同水体长度的二维点扩展函数示于图 5。

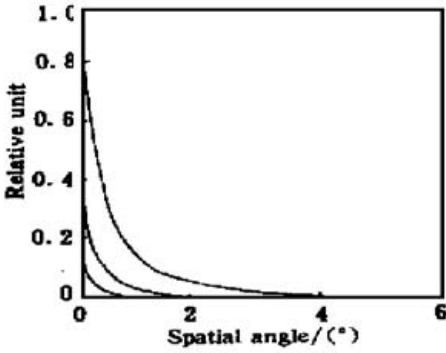


Fig. 4 1-D spread function calculated from measured 1-D data of the slit. The three curves from left to right correspond to scattering water path length 10 cm, 20 cm and 30 cm respectively.

根据(3)式,海水的调制传递函数可由频率丰富的实验物被水体散射前和散射后的图像频谱相除求得。图6给出三种散射水体长度的调制传递函数。由数据明显看出随距离增加光学传递函数的频谱变窄,这意味着水体对光的信息传输能力或载像能力下降。

根据线性系统的性质,设一段总长度为  $x$  的水体,可分成  $x_1, x_2, \dots, x_n$  段,其总点扩展函数等于各分段水体点扩展函数相卷积:  $PSF(x) = PSF(x_1) \otimes PSF(x_2) \otimes \dots \otimes PSF(x_n)$ 。

将通过水体的 10 cm 和 20 cm 长度处测得的  $PSF(x_1)$  和  $PSF(x_2)$  进行卷积,得出 30 cm 水体长度的  $PSF(x_3)$ ,将  $PSF(x_3)$  与实测  $PSF(30\text{ cm})$  数据进行比较,结果示于图7。

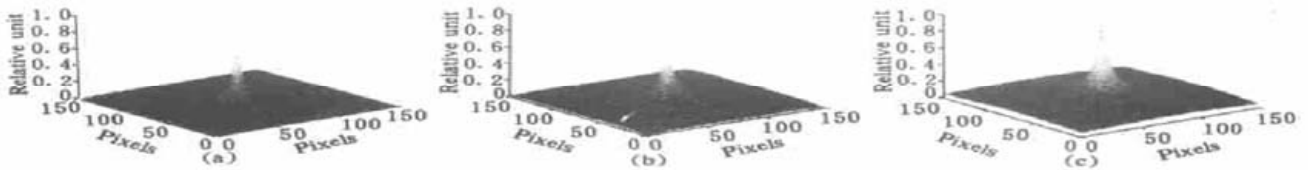


Fig. 5 2-D PSF. (a), (b) and (c) correspond to scattering water path length 10 cm, 20 cm and 30 cm respectively.

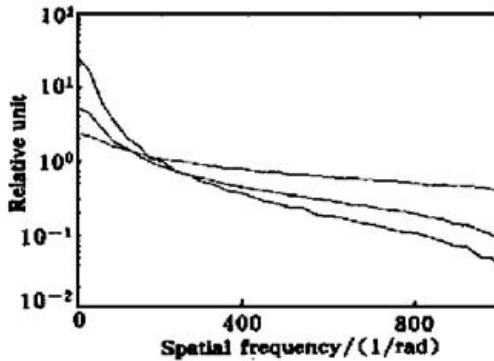


Fig. 6 Calculated  $\lg(MTF)$  curves. The three curves from top to bottom (right side) correspond to scattering water path length 10 cm, 20 cm and 30 cm respectively.

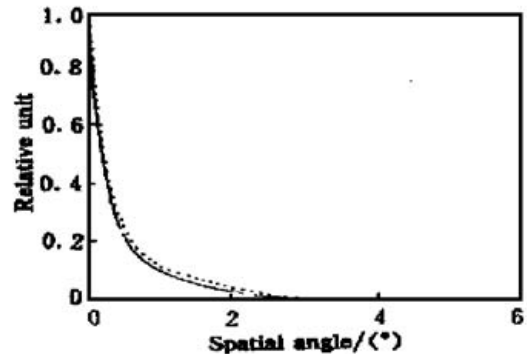


Fig. 7 Comparing calculated PSF and measured PSF. The real line stands for the measured PSF of 30cm water path length, while the dashed stands for the convolution of PSF corresponding to 10 cm and 20 cm water path length.

可以由计算结果和实验测量结果进行误差分析,误差的均方值由下式计算:

$$\bar{e}^2 = \sum_{i=1}^n [PSF(x_3) - PSF(30\text{ cm})]^2 / n$$

其中  $n$  为数据个数。计算结果,均方误差值为 0.1456, 相对误差 3.22%。

**结 论** 通过本实验,说明用图像传输方法测量水体的点扩展函数和光学传递函数的可行性。比用点光源直接测量的方法噪声小,系统简单,不必进行过多的调节,可靠性高。数据处理部分

可以制作成应用软件,使得现场测量水体点扩展函数简单易行。在研究水下图像传输时可避免多次散射情况的复杂计算。本系统测量角分辨率  $0.022^\circ$ , 测量角度范围  $0.022^\circ \sim 5.600^\circ$ 。可用于测量海水小角度散射函数。系统的精度取决于图像接收系统即 CCD 及图像卡的精度。实验结果表明点扩展函数测量均方误差值为 0.1456, 相对误差 3.22%。

### 参 考 文 献

- [1] Duntley S Q. Light in the sea. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **53**(2): 214~ 133
- [2] Yura H T. Small-angle scattering of light by ocean water. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(1): 114~ 118
- [3] Bruscalginoi P. Monte Carlo-calculations of the modulation transfer function or an optical system operating in a turbid medium. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(15): 2813~ 2824
- [4] Mertens L E, Replogle F S, Jr. Use of point spread and beam spread function for analysis of imaging systems in water. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(8): 1105~ 1117
- [5] 刘智深, 贺明霞. 海洋辐射传递的 Fourier 光学方法. 中国科学 (A), 1985, (11): 1014~ 1021
- [6] Liu Zhishen. The optical information transmission in the ocean. Zhou Di ed. *Oceanology of China Seas*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994, **2**: 523~ 532
- [7] Wells W H. Loss of resolution in water as a result of multiple small-angle scattering. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(6): 686~ 691
- [8] More A. Diffusion de la lumiere par les eaux de mer. Resultats experimentaux et approche theorique. *Optics of the Sea*, 1973, AGARD Lecture Series 61 (NATO)
- [9] Grosso V A D. Modulation transfer function of water. *Proc. SPIE*, 1975, **64**: 34
- [10] Grosso V A D. Optical transfer function measurements in the Sargasso Sea. *Proc. SPIE*, 1978, **160**: 74
- [11] 刘智深, 黄晓圣, 贺明霞. 海洋与大气光学传递函数与自然光辐射场的关系. 光学学报, 1987, **7**(9): 707 ~ 713
- [12] Voss K J. Measurement of the point spread function in the ocean. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(25): 3638~ 3642

## Measurement of the Point Spread Function of Seawater with Method of Image Transmission

Yu Yifan Chen Weizhen Huang Hailong Liu Zhishen

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

(Received 25 February 2000; revised 17 April 2000)

**Abstract** A laboratory facility to measure and calculate the point spread function (PSF) and the optic transfer function (OTF) of seawater is described. The PSF and OTF are important parameters for predicting light propagation and imaging system performance. An image transmission method for measuring the PSF is discussed and the 1-D and 2-D PSF curves for various scattering water path lengths are presented. The OTF are also calculated by FFT from the data of PSF. Some results are shown, which agree with the theory.

**Key words** point spread function, optic transfer function, light scattering, image transmission.