

引用格式: SUN Shuwei, WANG Hao, WANG Wei, et al. The Effect of Temperature and Salinity on Imaging Quality of Optical System in Underwater Turbulence[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12):1211004

孙枢为,王昊,汪伟,等.水下湍流中温度、盐度对光学系统成像质量影响分析[J].光子学报,2022,51(12):1211004

# 水下湍流中温度、盐度对光学系统成像质量影响分析

孙枢为<sup>1,2,3</sup>,王昊<sup>2,3</sup>,汪伟<sup>1,2</sup>,李鹏<sup>1,2</sup>,康福增<sup>2</sup>,谢小平<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 光子网络技术研究室,西安 710119)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(3 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**针对湍流对水下成像系统的影响,基于 Yao 折射率起伏功率谱,推导了平面波的波结构函数,完善了水下光学成像模型,其优势在于将难以测量的微观参量如动能耗散率和温度耗散率,用平均温度和平均盐度等宏观参量代替。数值仿真了不同平均温度与平均盐度条件下水下湍流通过改变波前,进而对成像系统调制传递函数产生影响。仿真结果表明,平均温度与平均盐度升高,均会造成系统成像质量下降,进一步研究发现平均盐度增加,不同空间频率的调制传递函数值均线性下降,且下降幅度基本一致;随着平均温度升高,调制传递函数值线性下降,且高频成分的调制传递函数值下降得更快。为验证成像模型的正确性,设计搭建了 3 m 长的水下光学成像实验平台,利用相机记录分辨率板透过湍流的成像情况,得到不同平均温度与平均盐度条件下的调制传递函数曲线。对比实验与仿真结果发现,在平均温度 10 °C~30 °C 与平均盐度 0 ppt~30 ppt 范围内,对比度随平均温度与平均盐度变化趋势相同。该研究对水下光学成像系统的设计优化及水下图像处理具有一定的参考价值。

**关键词:**水下湍流;折射率起伏功率谱;波结构函数;调制传递函数;温度;盐度

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1211004

## 0 引言

地球表面的 70% 以上被海水覆盖,海洋的利用与开发对国家发展具有极为重要的意义,各国竞相加大对海洋的研究与探索。水下成像技术是探索海洋资源的一种关键手段,而湍流是影响水下成像质量的重要因素。湍流是由于介质各部分流速不同,在交界面产生小型涡旋的现象,这一现象会直接导致介质折射率分布发生变化,从而对光束的波前结构发生变化,最终造成成像质量下降。湍流现象在海洋中普遍存在,因此研究湍流对水下成像质量的影响对于水下信息获取与空间光通信<sup>[1]</sup>具有重要意义。1966年,FRIED DL<sup>[2]</sup>提出了 MTF 理论和基于 Kolmogorov 功率谱的大气湍流中长、短曝光成像的光学分辨率模型,发现了短曝光分辨率明显优于长曝光分辨率。2009年,HOU WL<sup>[3-5]</sup>提出了一种基于 Kolmogorov 型折射率谱的简单水下成像模型,初步研究了散射效应和湍流对光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)的影响。2011年 CHEN YZ 等<sup>[6]</sup>基于 HOU WL 提出的 OTF 模型,加入衍射对水下成像的影响。2016年,PU H 等<sup>[7]</sup>在 Nikishov 功率谱基础上研究了不同曝光条件下的调制传递函数。在此期间,大部分对水下湍流的研究基本以 Nikishov 功率谱<sup>[8]</sup>为基础,但此功率谱中并未考虑到水体平均温度与平均盐度的影响,折射率起伏模型还需要进一步完善。2019年,YAO JR 改进了折射率起伏功率谱<sup>[9-10]</sup>,以平均温度、平均盐度表征涡旋扩散

**基金项目:**国家重点研发计划(No.2018YFC0307904),中国科学院 A 类战略性先导科技专项(No.XDA22030203),中科院西部之光(No.XAB2019B22)

**第一作者:**孙枢为(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为水下成像与水下光通信。Email: sunshuwei@opt.cn

**导师(通讯作者):**汪伟(1982—),男,研究员,博士,主要研究方向为空间光通信。Email: wangwei2012@opt.cn

**收稿日期:**2022-04-19;**录用日期:**2022-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

率,建立了温度和盐度为主导的功率谱模型。该功率谱相较于Nikishov功率谱更加完善,但该模型缺乏实验论证。

本文基于Yao折射率起伏功率谱,推导了平面波波结构函数的解析表达式,完善了水下光学成像模型。相较于已有的水下光学成像模型,该模型将传统模型中难以测量的微观参量如动能耗散率和温度耗散率,用平均温度和平均盐度等宏观参量代替,更贴合实际应用。依据水下光学成像模型,研究了平均温度和平均盐度对MTF的影响。设计搭建了一套长度为3 m的水下成像实验平台,得到了在不同温度和盐度的湍流条件下MTF的变化情况,对仿真模型进行了验证。利用温度、盐度以及流速等容易测量的物理量,通过模型可以对不同海洋湍流条件下成像质量的退化情况进行评估,为水下图像复原与矫正提供了一种物理参考模型。

## 1 理论模型

### 1.1 折射率起伏功率谱

湍流现象会使介质折射率不均匀,从而造成成像质量下降,因此研究湍流造成的成像质量变化本质上是研究折射率起伏情况。QUAN YH和FRY E于1995年提出了用于描述平均温度和平均盐度变化对功率谱线性系数贡献的水折射率多项式<sup>[11]</sup>。在平均温度处于 $[0\text{ }^\circ\text{C}, 30\text{ }^\circ\text{C}]$ 范围,平均盐度处于 $[0\text{ ppt}, 40\text{ ppt}]$ (1 ppt=0.001)范围,波长处于 $[400\text{ nm}, 900\text{ nm}]$ 的条件下,折射率可表示为(文中温度 $T$ 与盐度 $S$ 均代表平均温度与平均盐度)

$$n = a_0 + (a_1 + a_2\langle T \rangle + a_3\langle T \rangle^2)\langle S \rangle + a_4\langle T \rangle^2 + \frac{a_5 + a_6\langle S \rangle + a_7\langle T \rangle}{\lambda} + \frac{a_8}{\lambda^2} + \frac{a_9}{\lambda^3} \quad (1)$$

式中, $T$ 表示温度, $S$ 表示盐度, $\langle \cdot \rangle$ 表示取平均值, $a_n$ 为常数项,其数值为

$$\begin{cases} a_0 = 1.31405, a_1 = 1.779 \times 10^{-4}, a_2 = -1.05 \times 10^{-6}, a_3 = 1.6 \times 10^{-8}, a_4 = -2.02 \times 10^{-6}, \\ a_5 = 15.868, a_6 = 0.01155, a_7 = -0.00423, a_8 = -4382, a_9 = 1.1455 \times 10^6 \end{cases} \quad (2)$$

介质的折射率 $n$ 为平均折射率 $n_0$ 与折射率的起伏量 $n'$ 之和,可表示为

$$n = n_0 + n' = n_0 + A \cdot T' + B \cdot S' \quad (3)$$

式中, $T'$ 和 $S'$ 分别为温度和盐度的起伏量,对式(1)求导,假设 $d\lambda = 0$ 即不存在非线性效应,可得线性系数 $A$ 、 $B$ 的表达式分别为

$$A = \left. \frac{\partial n(T, S, \lambda)}{\partial T} \right|_{T=\langle T \rangle, S=\langle S \rangle} = a_2\langle S \rangle + 2a_3\langle T \rangle\langle S \rangle + 2a_4\langle T \rangle + \frac{a_7}{\lambda} \quad (4)$$

$$B = \left. \frac{\partial n(T, S, \lambda)}{\partial S} \right|_{T=\langle T \rangle, S=\langle S \rangle} = a_1 + a_2\langle T \rangle + a_3\langle T \rangle^2 + \frac{a_6}{\lambda} \quad (5)$$

图1为线性系数 $A$ 和 $B$ 随平均温度和平均盐度变化情况。可以看出 $A$ 受平均温度变化的影响更为显著,系数 $B$ 基本只与平均温度呈负相关,且变化范围较小。

空间折射率起伏功率谱可表示为<sup>[9]</sup>

$$\Phi_n(\kappa, \langle T \rangle, \langle S \rangle, \lambda) = A^2 \cdot \Phi_T(\kappa) + B^2 \cdot \Phi_S(\kappa) + 2 \cdot A \cdot B \cdot \Phi_{TS}(\kappa) \quad (6)$$

式中, $\Phi_T(\kappa)$ 、 $\Phi_S(\kappa)$ 和 $\Phi_{TS}(\kappa)$ 分别代表温度功率谱、盐度功率谱和温度-盐度耦合功率谱。三种功率谱可以解析拟合为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} \Phi_i(\kappa, \langle T \rangle, \langle S \rangle) = & \left[ 1 + 21.61(\kappa\eta)^{0.61} c_i^{0.02} - 18.18(\kappa\eta)^{0.55} c_i^{0.04} \right] \times \frac{1}{4\pi} \beta_0 \epsilon^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{11}{3}} \chi_i \cdot \\ & \exp\left(-176.90 \cdot (\kappa\eta)^2 c_i^{0.96}\right) \quad i \in \{T, S, TS\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\beta_0 = 0.72$ , $\epsilon$ 为动能耗散率, $\eta$ 为Kolmogorov微观尺寸, $c_i$ 为常数, $\eta$ 、 $c_i$ 以及 $\chi_i$ 均与平均温度与平均盐度相关,其具体计算过程见附录。

### 1.2 波结构函数与水下成像模型

湍流现象会影响光束波前,从而改变系统成像质量,通过1.1节中湍流折射率起伏功率谱可以求解波结

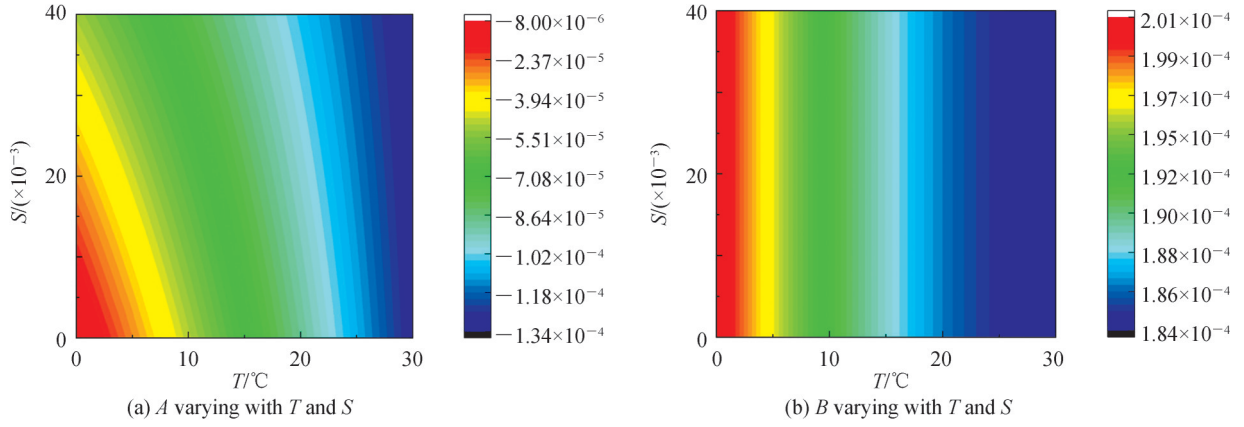


图1 线性系数随温度与盐度变化情况

 Fig.1 Linear coefficients varying with  $T$  and  $S$ 

构函数。平面波在各向同性的均匀海水湍流中传输,其波结构函数为<sup>[12]</sup>

$$D_{\text{pl}}(\rho, L) = 8\pi^2 k^2 L \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa\rho)] \cdot \Phi_n(\kappa) \kappa d\kappa \quad (8)$$

式中,  $k = 2\pi/\lambda$  定义为波数,  $\Phi_n(\kappa)$  为折射率起伏功率谱。将式(7)中参数定义为:  $\Delta A_i = 21.61\eta^{0.61} c_i^{0.02}$ ,  $\Delta B_i = 18.18\eta^{0.55} c_i^{0.04}$ ,  $\Delta C_i = 174.90\eta^2 c_i^{0.96}$ , 式(8)可以改写为

$$D_{\text{pl},i}(\rho, L) = 2\pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \times \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa\rho)] \cdot (1 + \Delta A_i \kappa^{0.61} - \Delta B_i \kappa^{0.55}) \cdot \exp(-\Delta C_i \kappa^2) \cdot \kappa^{-8/3} d\kappa \quad (9)$$

式中,  $J_0$  为零阶贝塞尔函数, 贝塞尔函数写作泰勒展开的形式为

$$J_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n! \Gamma(n+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n} \quad (10)$$

式中,  $\Gamma$  为 Gamma 函数, 零阶贝塞尔函数在零点处的值为 1, 即  $J_0(0) = 1$ , 将式(10)带入式(9)得

$$D_{\text{pl},i}(\rho, L) = 2\pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \int_0^\infty \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n! \Gamma(n+1)} \left(\frac{\kappa\rho}{2}\right)^{2n} \times (1 + \Delta A_i \kappa^{0.61} - \Delta B_i \kappa^{0.55}) \cdot \exp(-\Delta C_i \kappa^2) \cdot \kappa^{-8/3} d\kappa \quad (11)$$

式中对于幂函数以及 e 指数函数相乘的积分部分可以转化为 Gamma 函数的形式, 表达式为

$$\int_0^\infty x^n \exp[-(qx)^m] dx = \frac{1}{mq^{n+1}} \Gamma\left(\frac{n+1}{m}\right) \quad [m, n > 0, \text{ and real}] \quad (12)$$

利用式(12)可将式(11)中较为复杂的积分形式化简为 Gamma 函数的和的形式, 即

$$D_{\text{pl},i}(\rho, L) = \pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n! \Gamma(n+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n} \left(\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right)^n \left[ \Delta C_i^{5/6} \Gamma\left(n - \frac{5}{6}\right) + \Delta A_i \Delta C_i^{5/6 - 0.305} \Gamma\left(n - \frac{5}{6} + 0.305\right) - \Delta B_i \Delta C_i^{5/6 - 0.275} \Gamma\left(n - \frac{5}{6} + 0.275\right) \right] \quad (13)$$

对式(13)含有  $\Delta C_i$  的各项分子分母均乘常数使其大小不变, 转化为  $\Gamma(a+n)/\Gamma(a)$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  (其中  $a$  为常数) 的形式, 即

$$D_{pl,i}(\rho, L) = \pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n} \left(\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right)^n \left[ \Delta C_i^{5/6} \frac{\Gamma\left(n - \frac{5}{6}\right)/\Gamma(-5/6) \cdot \Gamma(-5/6)}{\Gamma(n+1)/\Gamma(1) \cdot \Gamma(1)} + \right. \\ \left. \Delta A_i \Delta C_i^{5/6-0.305} \frac{\Gamma\left(n - \frac{5}{6} + 0.305\right)/\Gamma(-5/6 + 0.305) \cdot \Gamma(-5/6 + 0.305)}{\Gamma(n+1)/\Gamma(1) \cdot \Gamma(1)} - \right. \\ \left. \Delta B_i \Delta C_i^{5/6-0.275} \frac{\Gamma\left(n - \frac{5}{6} + 0.275\right)/\Gamma(-5/6 + 0.275) \cdot \Gamma(-5/6 + 0.275)}{\Gamma(n+1)/\Gamma(1) \cdot \Gamma(1)} \right] \quad (14)$$

引入 Pochhammer 符号, 该符号的定义为  $(a)_n = \Gamma(a+n)/\Gamma(a)$ ,  $n=1, 2, 3, \dots$ , 其中  $\Gamma(1)=1$ , 式(14) 简化为 Pochhammer 符号形式为

$$D_{pl,i}(\rho, L) = \pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2n} \left(\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right)^n \left[ \Delta C_i^{5/6} \frac{(-5/6)_n \cdot \Gamma(-5/6)}{(1)_n} + \Delta A_i \Delta C_i^{5/6-0.305} \times \right. \\ \left. \frac{(-5/6+0.305)_n \cdot \Gamma(-5/6+0.305)}{(1)_n} - \Delta B_i \Delta C_i^{5/6-0.275} \frac{(-5/6+0.275)_n \cdot \Gamma(-5/6+0.275)}{(1)_n} \right] \quad (15)$$

为进一步简化式(15)中的求和项, 引入合流超几何函数

$${}_pF_q(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q; \gamma) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\alpha_1)_n (\alpha_2)_n \dots (\alpha_p)_n}{(\beta_1)_n (\beta_2)_n \dots (\beta_q)_n} \frac{\gamma^n}{n!} \quad (16)$$

式(15)简化为

$$D_{pl,i}(\rho, L) = \pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \left\{ -\Delta C_i^{5/6} \Gamma\left(\frac{5}{6}\right) \left[ {}_1F_1\left(-\frac{5}{6}; 1; -\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right) \right] - \right. \\ \left. \Delta A_i \Delta C_i^{5/6-0.305} \Gamma\left(-\frac{5}{6} + 0.305\right) \left[ {}_1F_1\left(-\frac{5}{6} + 0.305; 1; -\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right) \right] + \right. \\ \left. \Delta B_i \Delta C_i^{5/6-0.275} \Gamma\left(-\frac{5}{6} + 0.275\right) \left[ {}_1F_1\left(-\frac{5}{6} + 0.275; 1; -\frac{\rho^2}{4\Delta C_i}\right) \right] \right\} \quad (17)$$

对于合流超几何函数  ${}_1F_1(\alpha; \beta; -\gamma)$  在  $\gamma \gg 1$  时, 合流超几何函数可近似为指数函数, 表示为

$${}_1F_1(\alpha; \beta; -\gamma) \approx \frac{\Gamma(\beta)}{\Gamma(\beta-\alpha)} \gamma^{-\alpha} \quad \gamma \gg 1 \quad (18)$$

利用式(19)将合流超几何函数简化为系数为 gamma 函数的幂函数形式, 则式(18)可简化为

$$D_{pl,i}(\rho, L) = \pi k^2 L \beta \epsilon^{-1/3} \chi_i \left[ -4^{-5/6} \frac{\Gamma\left(-\frac{5}{6}\right)}{\Gamma\left(\frac{11}{6}\right)} \rho^{\frac{5}{3}} - 4^{0.305-5/6} \Delta A_i \times \right. \\ \left. \frac{\Gamma\left(-\frac{5}{6} + 0.305\right)}{\Gamma\left(\frac{11}{6} - 0.305\right)} \rho^{\frac{5}{3}-0.61} + 4^{0.275-5/6} \Delta B_i \frac{\Gamma\left(-\frac{5}{6} + 0.275\right)}{\Gamma\left(\frac{11}{6} - 0.275\right)} \rho^{\frac{5}{3}-0.55} \right] \quad (19)$$

式(19)为平面波的波结构函数的解析表达式。根据波结构函数可以求解 MTF<sub>ur</sub>, 湍流环境下长曝光成像的 MTF 表达式为<sup>[2]</sup>

$$\text{MTF}_{\text{tur}} = \exp(-0.5 \cdot D_{\text{pl}}(\rho, L)) \quad (20)$$

式中,  $D_{\text{pl}}(\rho, L) = A^2 \cdot D_{\text{pl,T}}(\rho, L) + 2AB \cdot D_{\text{pl,TS}}(\rho, L) + B^2 \cdot D_{\text{pl,S}}(\rho, L)$ , 在成像问题中  $\rho = \lambda\Omega$ ,  $\Omega$  为空间频率。水下成像必须依托于成像系统, 因此需要考虑镜头调制传递函数的影响, 对于衍射极限成像系统其调制传递函数  $\text{MTF}_0$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$\text{MTF}_0 = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right) - \frac{\Omega}{\Omega_0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2} \right] & \Omega \leq \Omega_0 \\ 0 & \Omega \geq \Omega_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $\Omega_0 = D/\lambda$  为空间截止频率,  $D$  为镜头的入瞳直径。接收端的调制传递函数是光学镜头调制传递函数  $\text{MTF}_0$  与海水湍流引起的调制传递函数  $\text{MTF}_{\text{tur}}$  两者的乘积<sup>[7]</sup>, 即

$$\text{MTF} = \text{MTF}_0 \cdot \text{MTF}_{\text{tur}} \quad (22)$$

式(22)为在湍流与光学镜头共同作用下的调制传递函数。

## 2 仿真结果分析

基于水下光学成像模型对调制传递函数进行仿真, 仿真条件如表1。图2为  $S = 1$  ppt时, 不同温度下的结果。图2(a)为MTF曲线随温度变化情况。水体温度由  $0^\circ\text{C}$  上升至  $30^\circ\text{C}$ , 截止频率由 0.95 下降至 0.5, MTF 曲线降低, 成像质量劣化, 结果表明温度升高, 湍流抑制了高空间频率成分, 即图像将失去部分细节信息。图2(b)为不同空间频率成分的 MTF 受温度影响情况。随着温度由  $0^\circ\text{C}$  升高至  $30^\circ\text{C}$ , 归一化空间频率  $\Omega/\Omega_0 = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$  的 MTF 值分别降低 0.316、0.400、0.458、0.474; 不同空间频率 MTF 受温度变化的影响不同, 空间频率越高, MTF 值下降越快, 这表明高频成分的 MTF 值相较于低频成分更敏感。

表1 仿真条件  
Table 1 The simulation conditions

Parameter	Data
$\chi_r$	$2.8 \times 10^{-7} \text{ K}^2/\text{s}$
$\epsilon$	$6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$
$L$	3 m
$D$	40 mm
$\lambda$	505 nm
$H$	$-2^\circ\text{C}/(\times 10^{-3})$

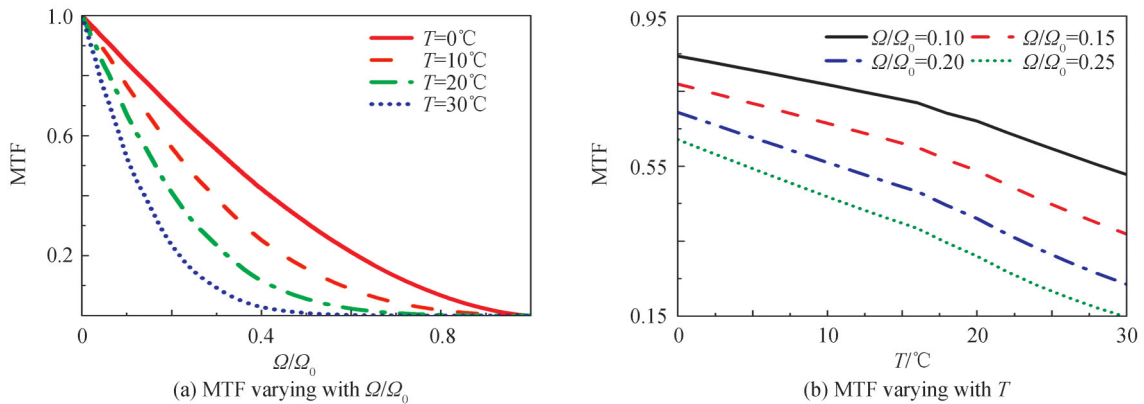


图2  $S = 1$  ppt时, 调制传递函数随温度变化情况仿真结果  
Fig. 2 MTF varying with temperature in simulation at  $S = 1$  ppt

图3为  $T = 20^\circ\text{C}$  时成像质量受平均盐度影响的仿真结果。由图3(a)可以看出盐度由 0 上升至 40 ppt, MTF 曲线略有下降, 截止频率基本不变, 平均盐度的升高对 MTF 曲线的影响有限。图4(b)为不同空间频



率成分受盐度的影响情况,  $\Omega/\Omega_0=0.10, 0.15, 0.20, 0.25$  的 MTF 值分别下降 0.077、0.081、0.089、0.092, 相差并不明显。结果表明: 不同空间频率的 MTF 值随盐度升高线性下降, 并且盐度对不同频率的 MTF 值影响基本相同。对比图 2(a) 与图 3(a) 可以看出, 温度变化对 MTF 的影响更为剧烈。结合图 1, 湍流对于成像质量的影响主要源于其造成了折射率分布的起伏, 此过程中平均温度变化引起的折射率分布起伏相较于平均盐度来说更为严重, 故而平均温度变化对于成像质量的影响更明显。

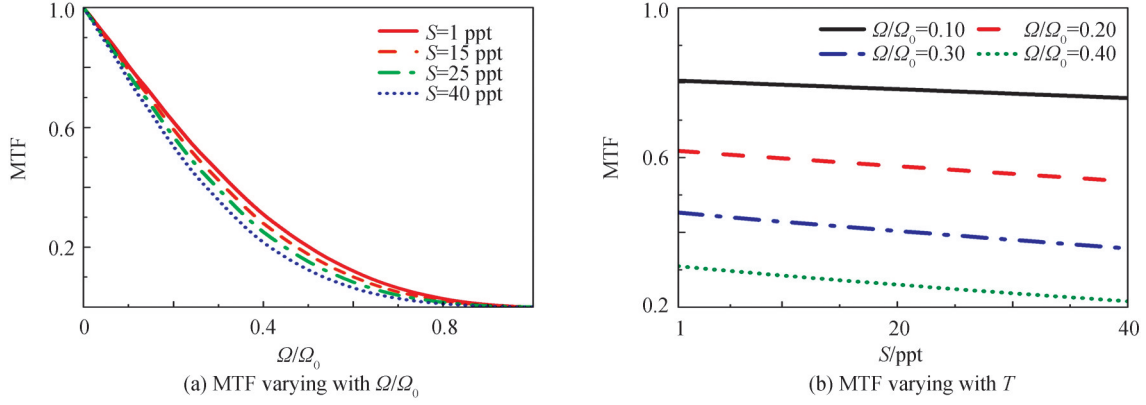


图 3  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  时, 调制传递函数随盐度变化情况仿真结果  
Fig. 3 MTF varying with salinity in simulation at  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

### 3 实验平台及结果分析

#### 3.1 实验平台

为对水下光学成像模型进行验证, 搭建了长度为 3 m 的实验平台, 如图 4。装置主要由水箱 ( $3\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ), 水泵 (流速可达到 2 m/s), 流速计 (量程 0 ~ 5 m/s, 测量精度 0.001 m/s), 调频器 (控制水泵流速) 和温控系统 (测量范围:  $10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ , 测量精度:  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ) 组成。水泵用于改变水体的流速从而控制湍流强度, 温控系统兼具加热升温 and 温度实时测量的功能, 水箱两侧分别为探测目标和 CCD 相机。实验可以根据雷诺数来判断是否产生湍流, 雷诺数  $Re$  的表达式为

$$Re = \frac{\rho u_{\text{avg}} L_{\text{tur}}}{\mu} \quad (23)$$

式中,  $\rho$  为介质密度,  $\mu$  为动力粘滞度,  $L_{\text{tur}}$  为水力直径, 实验装置中  $L_{\text{tur}} = 0.1\text{ m}$ ,  $u_{\text{avg}}$  为水箱中水体的平均流速。该实验条件下, 当水体流速大于 0.04 m/s, 雷诺数  $Re > 4\text{ }000$ , 即可产生湍流。

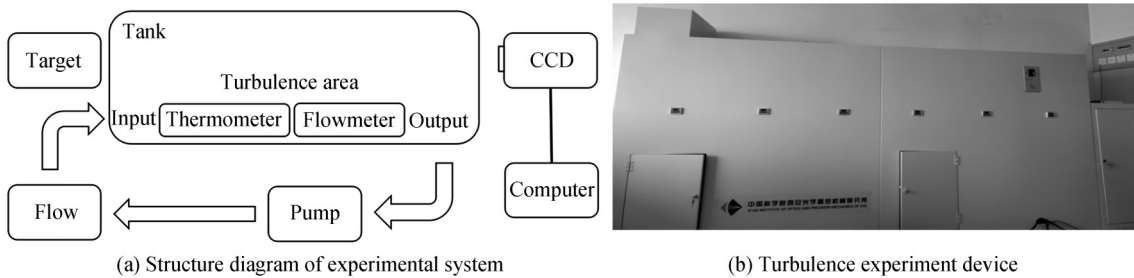


图 4 水下湍流实验装置  
Fig. 4 Underwater turbulence experiment device

实验选择分辨率板 (usaf1951) 作为探测目标, 光在湍流中传输距离为 3 m, 在固定流速下对温度范围在  $[10\text{ }^\circ\text{C}, 30\text{ }^\circ\text{C}]$ 、盐度范围为  $[1\text{ ppt}, 30\text{ ppt}]$  条件下, 成像质量的变化情况进行实验。仿真参数温度方差耗散率  $\chi_T$  与动能耗散率  $\epsilon$  在可根据实验参数进行估算,  $\chi_T$  由温度梯度和热扩散系数  $\kappa_T$  决定, 热扩散系数取常数  $\kappa_T = 1.4 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ , 其表达式为

$$\chi_T = 2\kappa_T \left\langle \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right\rangle \quad (24)$$

实验中温度在  $x, y$  方向基本一致,因此  $\partial T/\partial x = \partial T/\partial y = 0$ 。 $\epsilon$  取决于运动粘度  $\gamma$  与速度梯度,其表达式为

$$\epsilon = (5\gamma/2) \left\langle (\partial u/\partial x)^2 + (\partial u/\partial y)^2 + (\partial u/\partial z)^2 \right\rangle \quad (25)$$

式中,运动粘度取常数  $\gamma = 1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。因此只需测量温度梯度与速度梯度即可推算出  $\chi_T$  与  $\epsilon$ 。

### 3.2 实验结果分析

利用实验平台对仿真模型进行验证。实验过程中,调整水泵功率使流速满足湍流条件,待流速平稳后测量水箱内水体温度与流速分布情况,测量5次结果取其平均值。将相机设定为长曝光模式(曝光时间为0.2 s,即相机每0.2 s记录一次)调焦后使CCD相机成像界面清晰,在不同的温度、盐度条件下对于分辨率板的成像情况记录100张图片(即记录20 s内图像变化情况)。平均流速为  $u_{\text{avg}} = 0.1 \text{ m/s}$ ,温盐梯度比的表达式为  $H = (dT/dz)/(dS/dz)$ ,即竖直方向上的温度梯度与盐度梯度之比,因竖直方向水的温度分布与盐度分布,正好相反,故此值为负数。实验在水的表面与底部的不同位置分别测量5次温度值与盐度值取其平均值,可求得温度盐度梯度比值  $H = -2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{ppt}$ ,温度梯度的平方和为  $(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2 + (dT/dz)^2 = 1 \text{ }^\circ\text{C}^2/\text{m}^2$ ,流速梯度的平方和为  $(du/dx)^2 + (du/dy)^2 + (du/dz)^2 = 0.24 \text{ /s}^2$ ,带入式(24)与(25)可求得  $\chi_T = 2.8 \times 10^{-7} \text{ K}^2/\text{s}$ ,  $\epsilon = 6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^3$ ,此时实验条件与表1仿真条件相同。图5为不同温度和盐度条件下成像结果。

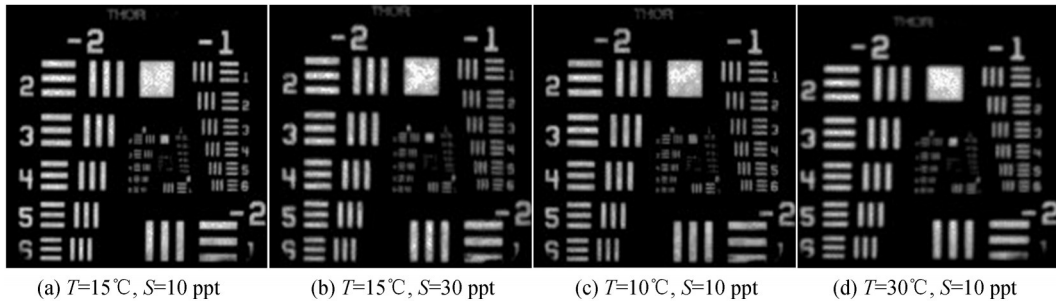


图5 不同温度与盐度条件下实验结果

Fig. 5 Experimental results under different temperature and salinity conditions

基于图5可以计算特定空间频率的MTF值,分辨率板条纹的灰度分布如图6。在计算MTF值时,将三个灰度极大值的平均值作为灰度最大值  $I_{\text{max}}$ ,将两个灰度极小值的平均值作为最小值  $I_{\text{min}}$ ,对于特定空间频率的MTF值等于对应条纹灰度最大值和最小值的差值与最大值和最小值的和值之比,即<sup>[13]</sup>

$$\text{MTF} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (26)$$

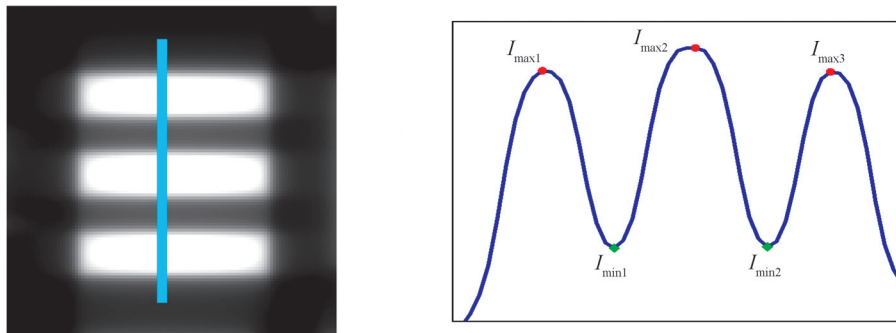


图6 分辨率板灰度分布

Fig.6 The gray level distribution of resolution board

图7(a)为  $S = 10 \text{ ppt}$  时,空间频率为  $17.19 \text{ lp/mm}$ ,  $24.93 \text{ lp/mm}$  和  $31.42 \text{ lp/mm}$  的MTF值随平均温度变化情况,图中实线为仿真结果,散点为实验结果。实验测量了  $17.19 \text{ lp/mm}$ ,  $24.93 \text{ lp/mm}$  和  $31.42 \text{ lp/mm}$

三个空间频率MTF值的变化情况。平均温度由10℃上升至30℃,上述空间频率对应的MTF值分别下降0.196,0.219,0.231,MTF值与水体温度呈现线性负相关,并且平均温度升高,高频成分相较于低频成分其MTF值下降更快。图7(b)为 $T = 20^\circ\text{C}$ 时,MTF随盐度变化情况。平均盐度由1 ppt升至30 ppt,空间频率为17.19 lp/mm,24.93 lp/mm和31.42 lp/mm的MTF值分别下降0.117,0.113和0.108。对比图7(a)与7(b)三个空间频率MTF值的下降幅度可以得出结论:温度变化相较于盐度变化对成像质量的影响更为严重,验证了仿真结果。在盐度较高时,实验结果相较于理论曲线整体偏下,其主要原因为:盐度增加,散射对于成像质量也会产生一定的影响。

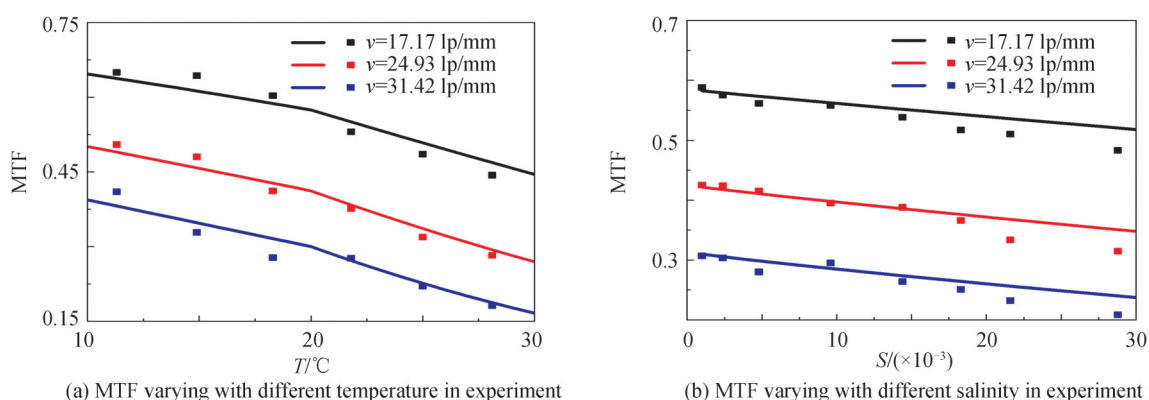


图7 实验中MTF随温度和盐度变化情况

Fig. 7 MTF varying with temperature and salinity in experiment

图8(a)为 $S = 10$  ppt,不同温度条件下MTF的变化情况。图8(b)为 $T = 20^\circ\text{C}$ 时,不同盐度条件下MTF曲线的变化情况。随着平均温度与平均盐度的升高,水体的折射率起伏加剧,水体折射率空间分布不均匀,光束的波前结构产生变化,成像质量降低。在温度较高时,实验得到的MTF曲线与仿真结果存在一定差异。实验过程中湍流是利用水泵带动水循环产生的,水泵工作的同时也会伴随部分气泡的产生,气泡会使光束产生偏折,导致实验结果与仿真曲线之间存在差异。

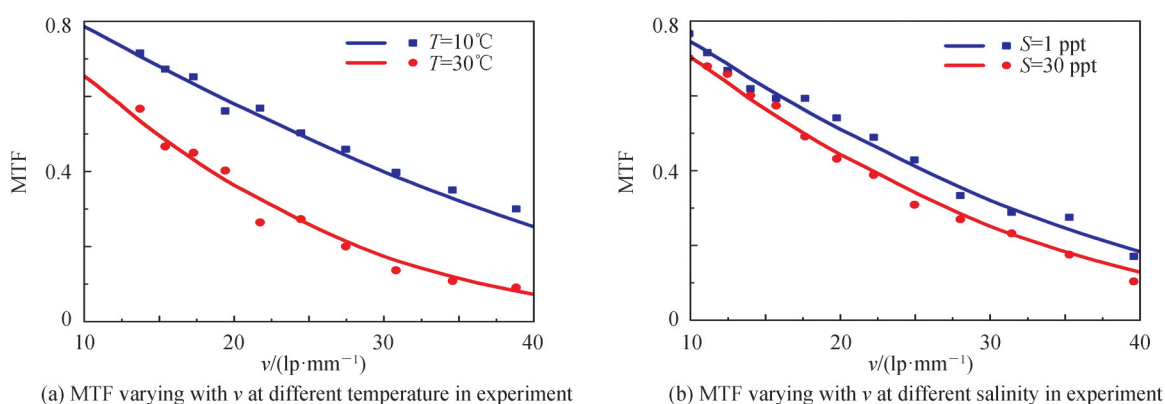


图8 实验中MTF随温度和盐度变化情况

Fig. 8 MTF varying with temperature and salinity in experiment

## 4 结论

本文推导了平面波波结构函数,完善了水下光学成像模型。基于该模型数值仿真了平均温度和平均盐度对于光学系统MTF的影响。搭建了水下湍流成像实验平台,通过实验得到了不同平均温度与平均盐度条件下的成像结果,并对比了仿真结果与实验结果。仿真与实验结果均表明,平均温度和平均盐度增加都会造成成像质量的下降,且平均温度改变相较于平均盐度改变对于MTF的影响更为严重。进一步研究发现,随着温度与盐度的升高不同空间频率的MTF值近似于线性下降,并且盐度升高对各空间频率MTF的



影响基本一致,温度升高对于高频成分MTF影响更为显著。

### 参考文献

- [1] GAO Duorui, XIE Zhuang, MA Rong, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0406001.  
高铎瑞,谢壮,马榕,等.卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J].光子学报,2021,50(4):0406001.
- [2] FRIED D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [3] HOU W L. A simple underwater imaging model[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2688-2690.
- [4] HOU W L, WOODS S, JAROSZ E, et al. Optical turbulence on underwater image degradation in natural environments [J]. Applied Optics, 2012, 51(14):2678-2686.
- [5] HOU W L, JAROSZ E, WOODS S, et al. Impacts of underwater turbulence on acoustical and optical signals and their linkage[J]. Optics Express, 2013, 21(4):4367-4375.
- [6] CHEN Y Z, YANG K C, ZHANG X H, et al. Modelling of beam propagation and its applications for underwater imaging [J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2011, 4(4): 398-406.
- [7] PU H, JI X L. Oceanic turbulence effects on long-exposure and short-exposure imaging[J]. Journal of Optics, 2016, 18(10):105704.
- [8] NIKISHOV V V, NIKISHOV V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction index[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2000, 27(1): 82-98.
- [9] YAO J R, ELAMASSIE M, KOROTKOVA O. Spatial power spectrum of natural water turbulence with any average temperature, salinity concentration and light wavelength[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(10): 1614-1618.
- [10] YAO J R, ZHANG H J, WANG R N, et al. Wide-range Prandtl/Schmidt number power spectrum of optical turbulence and its application to oceanic light propagation[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27807-27819.
- [11] QUAN X H, FRY E. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. Applied Optics, 1995, 34(18):3477-3480.
- [12] LU L, JI X, BAYKAL Y. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(22):27112-27122.
- [13] SUN Liying, XIA Min, HAN Jiefei, et al. Research of modulation transfer function of underwater imaging system in turbulent environment[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8):18-25.  
孙立颖,夏珉,韩捷飞,等.湍流环境中水下成像系统的调制传递函数研究[J].光学学报,2016,36(8):18-25.
- [14] ISDALE J, MORRIS R. Physical properties of sea water solutions: density[J]. Desalination, 1972, 10(4): 329-339.
- [15] MILLERO F J, POISSON A. International one-atmosphere equation of state of seawater[J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1981, 28(6): 625-629.
- [16] MOHAMMED E, MURAT U, YAHYA B, et al. Effect of eddy diffusivity ratio on underwater optical scintillation index [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(11): 1969-1973.
- [17] MCDUGALL T, FEISTEL R, MILLERO F, et al. The International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-10): Calculation and Use of Thermodynamic Properties[Z]. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2010.
- [18] MCDUGALL T J, BARKER P M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox[Z]. SCOR/IAPSO WG127, 2011.
- [19] JAMIESON D T, TUDHOPE J S, MORRIS R, et al. Physical properties of sea water solutions: heat capacity [J]. Desalination, 1969, 7(1):23-30.
- [20] NAYAR K G, SHARQAWY M H, BANCHIK L D, et al. Thermophysical properties of seawater: a review and new correlations that include pressure dependence [J]. Desalination, 2016, 390: 1-24.
- [21] TUDHOPE D. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity [J]. Desalination, 1970, 8: 393-401.

### 附录

式(7)中湍流的内尺寸与流体密度 $\rho$ 、粘滞系数 $\mu$ 以及动能耗散率 $\epsilon$ 有关<sup>[9]</sup>,即

$$\eta = \nu^{3/4} \epsilon^{-1/4} = \left[ \frac{\mu(\langle T \rangle, \langle S \rangle)}{\rho(\langle T \rangle, \langle S \rangle)} \right]^{3/4} \cdot \epsilon^{-1/4} \quad (\text{A1})$$

动力粘滞度 $\mu$ 的计算公式为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \mu = \mu_0 (a_{21} \langle s \rangle + a_{22}) \\ \langle s \rangle = 0.001 \langle S \rangle \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式(26)中,  $a_{21}$ 、 $a_{22}$ 及 $\mu_0$ 表达式为

$$\begin{cases} a_{21} = 1.5409136040 + 1.9981117208 \times 10^{-2} \langle T \rangle - 9.5203865864 \times 10^{-5} \langle T \rangle^2 \\ a_{22} = 7.9739318223 - 7.5614568881 \times 10^{-2} \langle T \rangle + 4.7237011074 \times 10^{-5} \langle T \rangle^2 \end{cases} \quad (\text{A3})$$

$$\mu_0 = \left[ 0.15700386464 \times (\langle T \rangle + 64.992620050)^2 - 91.296496657 \right]^{-1} + 4.2844324477 \times 10^{-5} \quad (\text{A4})$$

水的密度 $\rho$ 可以分解为盐度项与温度项<sup>[14-15,21]</sup>,其表达式为

$$\rho = \rho_T + \rho_S \quad (\text{A5})$$

$$\rho_T = 9.9992293295 \times 10^2 + 2.0341179218 \times 10^{-2} \langle T \rangle - 6.1624591598 \times 10^{-3} \langle T \rangle^2 + 2.2614664708 \times 10^{-5} \langle T \rangle^3 - 4.6570659168 \times 10^{-8} \langle T \rangle^4 \quad (\text{A6})$$

$$\rho_S = \langle s \rangle [ 8.020024089 \times 10^2 + 2.0005183488 \langle T \rangle + 1.6771024982 \times 10^{-2} \langle T \rangle^2 + 3.0600536746 \times 10^{-5} \langle T \rangle^3 - 1.6132224742 \times 10^{-5} \langle T \rangle^2 \langle s \rangle ] \quad (\text{A7})$$

式(7)中, $\chi_S$ 与 $\chi_{TS}$ 可以通过涡旋扩散系数 $d_r$ 与 $\chi_T$ 求得<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \chi_S(\langle T \rangle, \langle S \rangle, H, \chi_T) = \frac{d_r(\langle T \rangle, \langle S \rangle, H)}{H^2} \chi_T \\ \chi_{TS}(\langle T \rangle, \langle S \rangle, H, \chi_T) = \frac{1 + d_r(\langle T \rangle, \langle T \rangle, H)}{2H} \chi_T \end{cases} \quad (\text{A8})$$

涡旋扩散率 $d_r$ 与温度和盐度相关,其定义为<sup>[8]</sup>

$$d_r = \frac{K_S}{K_T} = \begin{cases} R_\rho + R_\rho^{0.5} \cdot (R_\rho - 1)^{0.5}, R_\rho \geq 1 \\ 1.85R_\rho - 0.85, 0.5 \leq R_\rho \leq 1 \\ 0.15R_\rho, R_\rho < 0.5 \end{cases} \quad (\text{A9})$$

式中, $K_S$ 和 $K_T$ 分别为盐度涡旋扩散系数和温度涡旋扩散系数,两者的比值即为涡旋扩散率 $d_r$ 。 $R_\rho$ 定义为温盐诱致比,是一个无量纲量,其表达式为<sup>[9,16]</sup>

$$R_\rho = \frac{\alpha}{\beta} |H| \quad (\text{A10})$$

式中, $H$ 为温度梯度与盐度梯度之比,即 $(\partial T / \partial z) / (\partial S / \partial z)$ , $\alpha$ 和 $\beta$ 分别代表温度扩散系数和盐度收缩系数,其表达式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_S \\ \beta = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial S} \Big|_T \end{cases} \quad (\text{A11})$$

利用 TEOS-10 toolbox<sup>[17-18]</sup>可以得出对应温度、盐度、压强条件下的 $\alpha, \beta$ 值。式(7)中,无量纲参数 $c_i$ 的值与普朗特数 Pr 和施密特数 Sc 相关,具体关系表示为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} c_T = 0.072^{\frac{4}{3}} \beta \text{Pr}^{-1}(\langle T \rangle, \langle S \rangle) \\ c_S = 0.072^{\frac{4}{3}} \beta \text{Sc}^{-1}(\langle T \rangle, \langle S \rangle) \\ c_{TS} = 0.072^{\frac{4}{3}} \beta \cdot 0.5 (\text{Sc}^{-1}(\langle T \rangle, \langle S \rangle) + \text{Pr}^{-1}(\langle T \rangle, \langle S \rangle)) \end{cases} \quad (\text{A12})$$

普朗特数 Pr 与施密特数 Sc 的表达式为

$$\begin{cases} \text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\sigma_T} \\ \text{Sc} = \frac{\mu^2}{5.954 \times 10^{-15} \langle T \rangle \rho} \end{cases} \quad (\text{A13})$$

式(A13)中,  $c_p$  水的比热容(单位:  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ),  $\sigma_T$  为热导率(单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。比热容  $c_p$  的表达式为<sup>[19-20]</sup>

$$c_p = 1000 \times (a_{11} + a_{12}(\langle T \rangle + 273.15) + a_{13}(\langle T \rangle + 273.15)^2 + a_{14}(\langle T \rangle + 273.15)^3) \quad (\text{A14})$$

式中  $a_{1n}$  为常数,其大小与平均盐度  $\langle S \rangle$  相关:

$$\begin{cases} a_{11} = 5.328 - 9.76 \times 10^{-2} \langle S \rangle + 4.04 \times 10^{-4} \langle S \rangle^2 \\ a_{12} = -6.913 \times 10^{-3} + 7.351 \times 10^{-4} \langle S \rangle - 3.15 \times 10^{-6} \langle S \rangle^2 \\ a_{13} = 9.6 \times 10^{-6} - 1.927 \times 10^{-6} \langle S \rangle + 8.23 \times 10^{-9} \langle S \rangle^2 \\ a_{14} = 2.5 \times 10^{-9} + 1.666 \times 10^{-9} \langle S \rangle - 7.125 \times 10^{-12} \langle S \rangle^2 \end{cases} \quad (\text{A15})$$

热导率  $\sigma_T$  的计算式为<sup>[21]</sup>

$$\sigma_T = \exp \left\{ \log \left( 240 + 0.0002 \cdot \left( \frac{\langle S \rangle}{1.00472} \right) \right) - 3 + 0.434 \times \left( 2.3 - \frac{343.5 + 0.037 \cdot \left( \frac{\langle S \rangle}{1.00472} \right)}{1.00024 \langle T \rangle + 273.15} \right) \times \left[ 1 - \frac{1.00024 \langle T \rangle + 273.15}{647.3 + 0.03 \left( \frac{\langle S \rangle}{1.00472} \right)} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (\text{A16})$$

## The Effect of Temperature and Salinity on Imaging Quality of Optical System in Underwater Turbulence

SUN Shuwei<sup>1,2,3</sup>, WANG Hao<sup>2,3</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>, KANG Fuzeng<sup>2</sup>, XIE Xiaoping<sup>1,2</sup>

(1 Laboratory of Photonics and Network, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Underwater imaging technology is a critical means to explore the ocean. With the development of underwater imaging technology, it is found that underwater turbulence is an important factor that restricts the imaging quality of optical system. Turbulence is a phenomenon of small vortices occurring at the interface due to different flow rates of each part of the medium. This physical phenomenon can directly lead to changes in the refractive index of the medium. Thus, it can change the wavefront structure of the beam, affect the modulation transfer function, and ultimately cause the degradation of the image quality at the receiving end. Most of the studies about turbulence on beam is based on refractive index and power spectrum, and the researches on turbulence is based on Nikishov's power spectrum. In this power spectrum, eddy diffusion rate is constant, does not relate to the average water temperature and the average salinity which can influence on eddy diffusion rate. Thus, the turbulence caused by the refractive index models still needs further refinement. Later, some scholars improved the refractive index fluctuation power spectrum. In this model, the average temperature and average salinity are used to characterize the vortex diffusion rate, and the refractive index fluctuation power spectrum model based on temperature and salinity is established. Compared with Nikishov's power spectrum, the power spectrum model is more complete,

but the temperature variance dissipation rate and kinetic energy dissipation rate used to characterize turbulence intensity cannot be measured in the experiment, resulting in a gap between the simulation model and practical applications. In order to study the effect of underwater turbulence on the imaging quality of optical systems, we deduced the wave structure function and established an underwater optical imaging model based on the refractive index fluctuation power spectrum contained with temperature and salinity. The effects of temperature and salinity on the modulation transfer function under turbulent conditions are simulated. For verifying the reliability of the turbulence imaging model, a 3-m long underwater optical imaging experiment platform is designed and built. A water pump and water tank are used to create a turbulence region with controllable turbulence intensity. A CCD camera also plays a part of the region to image the resolution plate, thus analyzing the imaging quality. By controlling the experimental conditions, the imaging results under different temperatures and different salinity conditions are obtained. On this basis, the modulation transfer function is analyzed after the ensemble average obtained by several experiments. The results show that the modulation transfer function of the image decreases with the increase of temperature and salinity. Further studies show that the contrast of different spatial frequencies decreases linearly with the increase of salinity, and the decrease amplitude is basically the same. With the increase of temperature, the MTF basically conforms to the linear decline law, and the MTF of high-frequency components decreases faster. The experimental results show that the imaging quality under turbulent conditions is affected more by temperature than salinity, and the experimental results are consistent with the simulation results. This research has certain reference value for the design optimization and development of underwater optical systems.

**Key words:** Underwater turbulence; Power spectrum; Wave structure function; Modulation transfer function; Temperature; Salinity

**OCIS Codes:** 110.4850; 010.4450; 010.7060; 010.7295