

湍流环境中水下成像系统的调制传递函数研究

孙立颖 夏 珉 韩捷飞 杨克成

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 为了研究湍流对水下成像系统的影响, 搭建了一套光学成像实验系统, 利用水泵和水槽制造流速可控的湍流实验区域, 使用 CCD 对正弦条纹目标成像, 并分析图像质量。通过对实验环境的控制, 得到不同浑浊度和不同流速下的成像结果, 并提取调制传递函数(MTF)对结果进行分析。结果表明, 悬浮颗粒散射在整个空间频率上造成调制对比度下降; 而湍流散射更容易造成高空间频率域的 MTF 下降; 随着进水口处流速的增加以及水体衰减系数的增大, 其 MTF 曲线加快衰减; 在湍流环境下的成像, 图像失真和分辨率下降由颗粒散射和湍流散射共同造成。

关键词 海洋光学; 调制传递函数; 正弦条纹法; 悬浮颗粒散射; 湍流散射

中图分类号 P733.3+1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0801002

Research of Modulation Transfer Function of Underwater Imaging System in Turbulent Environment

Sun Liying Xia Min Han Jiefei Yang Kecheng

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract In order to study the effect of turbulence on submarine imaging system, an optical experiment system is built using pump and tank to make the turbulence area with controllable water flow velocity. The CCD is used to imaging the sinusoidal fringe and the image quality is analyzed. The imaging results with various water turbidity and flow velocity are obtained through the control of imaging experiment environment. The modulation transfer function (MTF) is extracted to analyze the results. Experimental results show that the particle scattering causes modulation contrast declines in the whole spatial frequency. The effect caused by turbulence scattering is more obvious on the high frequency. With the increase of inlet flow velocity and the attenuation coefficient, the MTF curves show quick downward trends. The image distortion and decline of resolution are caused by the particle and turbulence scattering in the turbulent environment.

Key words oceanic optics; modulation transfer function; sinusoidal fringe method; particle scattering; turbulence scattering

OCIS codes 010.4450; 110.4100; 010.7060

1 引 言

近年来, 水下成像技术广泛应用于水下目标探测、水下地形地貌观测等各领域, 并得到了更多重视和发展。水体的悬浮颗粒散射是影响水下成像质量的主要因素, 因此在水下成像探测方面, 研究主要集中在通过偏振、距离选通以及调制等技术减少悬浮颗粒散射的影响, 这些研究多数是在实验室环境中的静态水体条件下进行。但在真实的水下环境中, 流体相较于静态水体会对成像造成更大的影响, 尤其是湍流的存在会明显地降低成像质量。在复杂海洋环境下, 最大成像距离难以达到静态水体实验条件下得到的结果, 像质也与静态水体条件下的实验结果有差异。因此, 研究湍流对水下成像的影响十分必要。

收稿日期: 2015-09-23; **收到修改稿日期:** 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(41276042, 61008050)

作者简介: 孙立颖(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事海洋光学方面的研究。E-mail: kebersun@163.com

导师简介: 杨克成(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术和激光技术方面的研究。

E-mail: kcyang@hust.edu.cn

目前关于湍流的研究主要集中在大气湍流,对于海洋湍流的研究非常少。大气湍流运动会引起光斑的漂移、闪烁以及衰减等效应,尤其在强湍流的影响下,光信号会受到严重的干扰,造成成像扭曲,产生噪声^[1]。随着科技的发展,对湍流的研究已扩展到海洋区域。在实验方面,探测海洋湍流主要运用海洋观测技术,多用于研究海洋湍流混合科学领域^[2-5]。Goodman 等^[6]提出了用于海洋测量的翼型剪切探头的标准工作原理、标定校准原理和校准方法。Kocsis 等^[7-8]对剪切流传感器进行了改进,为海洋湍流长期连续观测提供了条件。Burchard^[9]研究了应用于海洋的统计湍流模型,讨论了如何从 Navier-Stokes 方程推导出这些模型,并应用到实际的数值模拟中。Thorpe^[10]对海洋湍流的运动进行了详细介绍,并描述了海面 and 海底混合边界层中的湍流,以及密度分层的水之间的湍流运动。吴琳等^[11]提出了一种用以描述高折射率梯度门限的方法,采用折射率梯度的调和平均值研究了高超声速流场中的气动光学传输效应。钱仙妹等^[12]对非均匀湍流路径光传播的模型作了数值模拟,并分析了折射率结构常数,得到了一种模拟误差最小的最佳方案。罗曦等^[13]采用了随机并行梯度下降算法拟合了大气湍流廓线。张彩云等^[14]对压强、温度以及湿度对折射率结构常数的影响进行了数值计算,并研究了通过风廓线雷达回波分析湍流强度的方法。但到目前为止,关于水下湍流的光学性质方面的研究较少。

本文通过水下湍流环境下的成像研究,着重分析水下湍流的光学性质,讨论其对成像造成的影响。通过分析水下湍流的调制传递函数(MTF),采取一定的方法进行补偿或者矫正,以提高成像质量。

2 实验系统及实验过程

2.1 实验设备

在水下湍流环境下进行成像,需要在实验室环境中制造水下湍流环境,将水槽和水泵等设备连接构成一套水循环系统,由水泵提供动力,当进水口处的水流达到一定的速度,就会在水槽中产生湍流。水槽尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 2\text{ m}$,两端分别有横截面尺寸为 $0.04\text{ m} \times 0.04\text{ m}$ 的进水口和出水口用以连接水泵和流量计等设备。CCD 图像传感器和条纹显示板(Samsung 平板电脑, P3113)分别被安装在水槽的两侧。系统结构如图 1 所示。

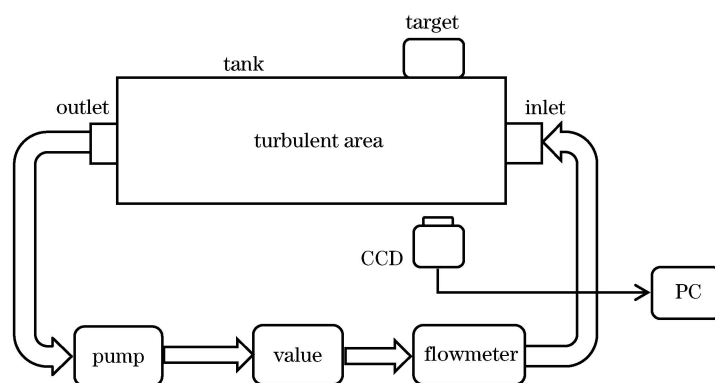


图 1 实验系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of experimental system

水槽是形成水下湍流的主要区域,水流从水槽进水口进入,在临近进水口的水槽区域内湍流最明显,且来自壁面的影响也较小,是主要的实验区域。水泵带动水流流动,水阀控制水流大小,通过在水槽进水口处制造一定速度的水流,即可在水槽中得到不同强度的水下湍流。流量计实时读取水流速度,进而可计算湍流的雷诺数以及湍流强度等数据。在实际的实验过程中,水阀可控制进水口处的水流速度在 $50 \sim 487\text{ L/min}$ 范围内。图 2 为实验装置图。

绘制多张具有不同空间频率的正弦条纹图像,通过平板电脑播放这些图像作为条纹显示。成像系统工作在黑暗条件下,平板本身的亮度足以使接收器完整响应正弦强度信号,因此平板屏幕本身的亮度足够作为光源使用,无需加入另外光源。在水槽另一侧的 CCD 图像传感器与计算机处理器直接相连,图像信息可以通过采集卡被计算机处理。



图 2 湍流实验装置

Fig. 2 Turbulent experimental device

2.2 实验过程

通过在湍流环境下的成像,来研究水下湍流对成像的影响,因此,实验中需要制造不同条件的水下湍流。在存在湍流的水下,影响成像质量的主要因素是悬浮颗粒散射以及湍流造成的散射^[15]。实验中通过改变水体浑浊度来改变悬浮颗粒散射,通过改变水流速度来改变湍流造成的散射。其中,描述水体浑浊度使用的参量是水体衰减系数,因此,实验需要不同的水样并测定水体的衰减系数,然后分别进行成像实验;在对目标条纹板成像的过程中,通过调节进水口处的水流速度来改变湍流。

衰减系数的测量根据比尔-朗伯定律,其描述的光强度为

$$I = I_0 \exp(-cl), \quad (1)$$

式中 I 为测量光强度, I_0 为初始光强度, c 为衰减系数, l 为测量距离。基于光强度和光照度的物理意义,将(1)式转化为光照度表达式。假设光源为平行光,光场不会扩大,可得

$$E = E_0 \exp(-cl). \quad (2)$$

在测量衰减系数时使用波长为 532 nm,功率为 0.5 W 的连续激光器作为光源,激光束通过准直系统后,进入水槽,并沿着水槽 2 m 长的长边进行传输。使用水下测量辐照度计(ZDS-10W-2D)来测量光照度。初始测量点在水槽的入口处,然后每隔 0.25 m 的距离进行一次测量,直至水槽另一侧。将记录的光照度数据带入(2)式中,利用 Matlab 软件拟合得到最终的水体衰减系数。为了提高数据准确性,每一种水样测量 3 次,衰减系数取拟合结果的平均值。

为了保持一致性,先测量水体样本的衰减系数,再进行成像实验。为了提高系统信噪比,降低计算误差,在黑暗环境下进行实验,以去掉空间背景光噪声干扰。此外,为了降低随机噪声以及电子噪声的影响,在每一个设定的流速条件下,条纹显示板的图像均在 3 s 内利用 CCD 拍摄 50 张图像。获取这些图像后,通过累加和平均的方法来减少随机噪声的影响。

成像实验中使用的目标图像是正弦条纹图像,利用平板电脑展示时,图像和平板电脑的分辨率均为 1024 pixel×768 pixel。图 3 为频率为 16 线对数的正弦图像。图片分为两部分,处于图片中心的竖条纹是获取 MTF 信息要使用的正弦条纹线;位于正弦条纹上下的横条纹是镜头校准线,帮助校准镜头的拍摄角度和高度。在图片的中心标有正弦条纹的线对数,用来核对实验结果。实验中使用了 12 幅不同的条纹图像,正弦条纹范围在 2~64 lp。根据图像的大小,将这些线对数转换为对应的单位 lp/mm。

通过水阀和流量计来实现对水流的流速控制。由于涡轮流量计本身的测量误差以及实时读数的误差,给出的进水口处的水流流速为近似值。当进水口处的流速为 1 m/s 时,CCD 对平板电脑的 12 幅正弦条纹图像依次进行拍摄,每幅图像在 3 s 内被拍摄 50 次,并将成像结果输入计算机处理器;当进水口处的流速分别为 2,3,4,5 m/s 时,重复成像步骤。图 4 为不同的流速情况下拍摄到的 16 线对数正弦图像。

可以依据雷诺数判断流体的状态是否为湍流,雷诺数为一种表征流体流动情况的无量纲数,表达式为

$$Re = \frac{\rho u_{\text{avg}} L}{\mu}, \quad (3)$$

式中 Re 为雷诺数, ρ 为介质的密度, μ 为动力粘度(单位为 m^2/s), L 为特征长度,对于管内流来说,特征长

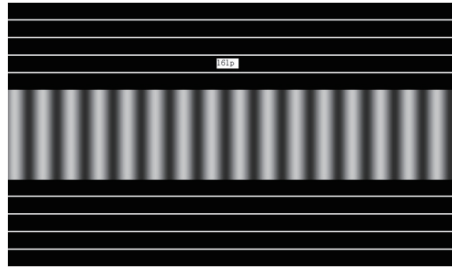


图 3 16 lp 正弦条纹图

Fig. 3 Sinusoidal fringe image with 16 lp

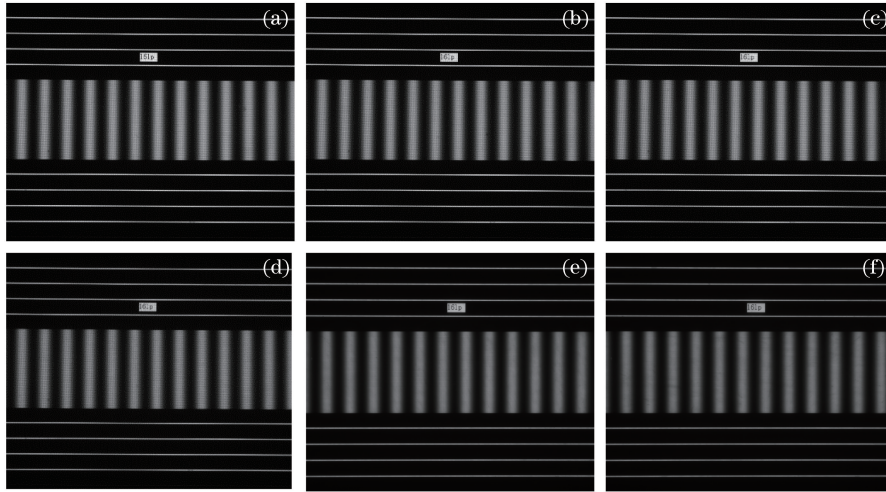


图 4 水体衰减系数为 0.39 m^{-1} , 进水口处不同水流速度下拍摄的 16 lp 正弦条纹图。

(a) 0 m/s; (b) 1 m/s; (c) 2 m/s; (d) 3 m/s; (e) 4 m/s; (f) 5 m/s

Fig. 4 16 lp sinusoidal fringe images obtained under different turbulent flow velocities at the water inlet with the beam attenuation coefficient of 0.39 m^{-1} . (a) 0 m/s; (b) 1 m/s; (c) 2 m/s; (d) 3 m/s; (e) 4 m/s; (f) 5 m/s

度可取为水力直径, u_{avg} 为水槽中流体的平均速度, 其与进水口处的水流速度 v 的关系为

$$u_{\text{avg}} = v \frac{S_{\text{inlet}}}{S_{\text{tank}}} \quad (4)$$

因此, Re 与 v 之间的关系可表示为

$$Re = \frac{\rho v L S_{\text{inlet}}}{\mu S_{\text{tank}}} \quad (5)$$

湍流强度 I 与 v 的关系为

$$I = 0.16 Re^{-1/8} = 0.16 \left(\frac{\rho v L S_{\text{inlet}}}{\mu S_{\text{tank}}} \right)^{-1/8} \quad (6)$$

一般条件下, $Re < 2000$ 为层流状态, $Re > 4000$ 为湍流状态, Re 取 $2000 \sim 4000$ 为过渡状态。当进水口水流速度为 1 m/s 时, 进水口处 Re 为 40000, 湍流强度为 4.25%; 进水口速度分别为 2, 3, 4, 5 m/s 时, 对应的进水口处的 Re 分别为 80000, 120000, 160000, 200000, 对应的湍流强度分别为 3.9%, 3.7%, 3.58%, 3.48%。根据流体学理论, 当 $Re > 2000$ 时, 流体的流动就归为湍流, 从得到的数据来看, 水体流动对象均为湍流^[16]。

3 结果分析

3.1 像质评价方法以及 MTF 计算

使用固有频率目标分析法测量和计算 MTF, 其中目标物使用正弦条纹(计算量要小于矩形条纹)。光学系统的 MTF 可表示为给定空间频率下像和物的调制度之比, 即

$$R_{\text{MTF}} = \frac{M_i(f)}{M_o(f)}, \quad (7)$$

式中 $M_i(f)$ 和 $M_o(f)$ 分别为像和物在空间频率 f 上的调制度, M 可定义为

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}}, \quad (8)$$

式中 A_{\max} 和 A_{\min} 分别为光强的极大值和极小值。因为正弦条纹的采样数据是渐变的, 所以通过计算采样数据的最大值和最小值来计算 M_i 。为了避免随机噪声, 将采样数据中的数各极大值和极小值分别求和并取平均值作为像空间的 A_{\max} 和 A_{\min} , 根据(8)式即可得到 $M_i(f)$ 。而 $M_o(f)$ 的值近似为 1, 这是因为在原始的正弦条纹图片中, 正弦纹条中最大灰度值设定为 255, 最小为 0。

3.2 实验结果

通过计算得到不同衰减系数以及进水口流速条件下, 湍流环境中的 MTF 曲线。所得的 MTF 为整个系统的总 MTF, 其包含成像系统本身的 MTF、悬浮颗粒散射以及湍流散射造成的 MTF。在一种水体样本中, 即衰减系数固定的情况下, 改变进水口处水流的速度并进行成像, 经过处理和计算即可得到不同湍流环境下的 MTF 曲线。实验中共使用了 6 种样本, 结果具有相同的规律, 因此选取了其中 2 组来进行说明, 如图 5 所示。

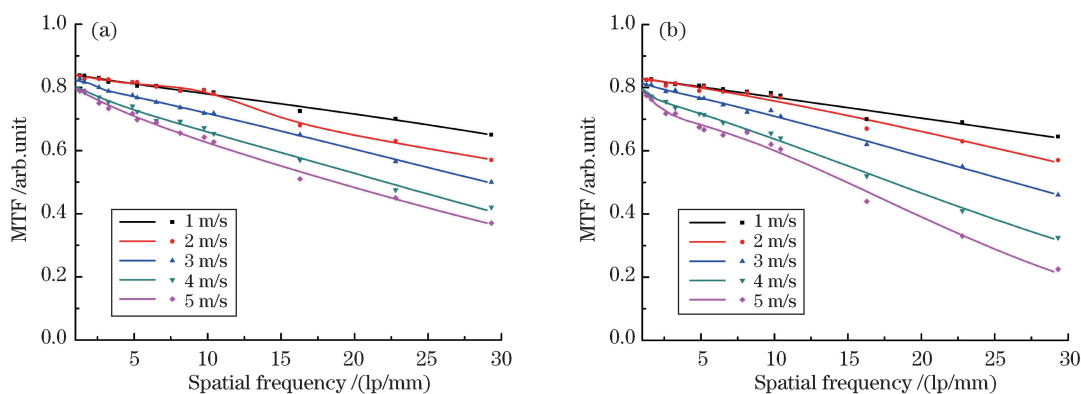


图 5 不同衰减系数下系统总的 MTF 曲线。(a) 0.39 m^{-1} ; (b) 0.7 m^{-1}

Fig. 5 Total MTF of system with different beam attenuation coefficients. (a) 0.39 m^{-1} ; (b) 0.7 m^{-1}

MTF 曲线描述了湍流环境下成像系统的分辨能力。从图 5(a)中可以看出, 其 MTF 曲线随着空间频率增加而衰减。当进水口流速为 1 m/s 时, 在 1 lp/mm 的情况下, MTF 值为 0.839; 空间频率增加到 29 lp/mm 时, MTF 值降为 0.652。而当进水口流速为 5 m/s 时, 在 1 lp/mm 的情况下, MTF 值为 0.797; 空间频率增加到 29 lp/mm 时, MTF 值降为 0.37。在 1 m/s 和 5 m/s 进水口流速下, 随着空间频率的增加, 两者的调制对比度的数值差增大, 即在进水口流速 5 m/s 情况下 MTF 曲线的衰减快于 1 m/s 的情况, 充分说明在较高的流速下, 受到湍流场影响的成像系统的分辨能力较差。因此, 在水体衰减系数为 0.39 m^{-1} 时, 进水口流速越大, 湍流场影响下的成像分辨率下降的越剧烈, 通过湍流场的成像图像会丢失更多的细节。从图 5(a)和(b)可以看出, 不同的衰减系数下, MTF 曲线的规律一致。

综上所述可以得出, 在任意水体浑浊度下, MTF 曲线均存在一致的规律: 1) 随着空间频率的增加而衰减; 2) 随着进水口水流速度的增加而呈现下降趋势; 3) 随着进水口水流速度的增加而衰减加快。

图 6 为在同一进水口流速(5 m/s)下, 不同的水样中 MTF 曲线变化。在其他进水口水流速度下, MTF 曲线具有相同的规律。

从图 6 中可以看出, 当衰减系数为 0.08 m^{-1} 时, 在 1 lp/mm 的情况下, MTF 值为 0.827; 当空间频率增加到 29 lp/mm 时, MTF 值降为 0.432。而当衰减系数为 0.7 m^{-1} 时, 在 1 lp/mm 的情况下, MTF 值为 0.79; 空间频率增加到 29 lp/mm 时, MTF 值降为 0.217。显然, 随着水体衰减系数的增大, MTF 曲线衰减加快。说明水体的衰减系数越大, 湍流场影响下的成像系统的分辨能力越差, 系统的成像结果会丢失更多的细节, 直接观测图像会更模糊。当进水口流速在 1~4 m/s 之间时, 衰减系数的改变影响湍流场成像系统分辨率的

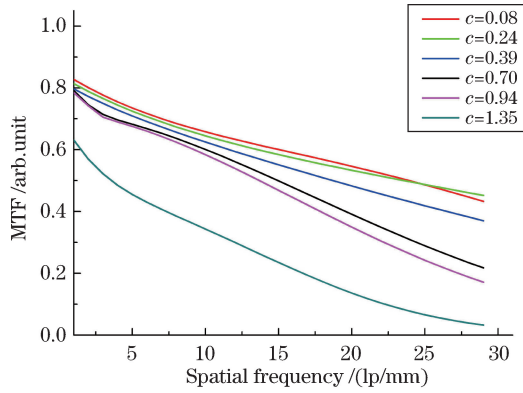


图 6 在相同进口流速不同的水体衰减系数下的 MTF($v=5$ m/s)

Fig. 6 MTF with different attenuation coefficients at the same flow velocity ($v=5$ m/s)

现象是相似的,可以得到与进水口流速为 5 m/s 时相同的结论。

影响水下成像的最主要因素是悬浮颗粒散射,而在湍流存在的环境下,湍流造成的散射是另一个原因。下面从悬浮颗粒散射和湍流散射的角度去分析 MTF 曲线的规律。

首先,将湍流场视为一个光学系统,影响其光学性质的因素是多方面的,而对于湍流场,影响因素有程辐射、悬浮颗粒散射和湍流散射,因此湍流场总的 MTF 可表示为^[17]

$$R_{\text{MTF}}^{\text{Total}} = R_{\text{MTF}}^{\text{path}} R_{\text{MTF}}^{\text{par}} R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}, \quad (9)$$

式中 $R_{\text{MTF}}^{\text{Total}}$ 为总的 MTF, $R_{\text{MTF}}^{\text{path}}$ 为程辐射造成的 MTF, $R_{\text{MTF}}^{\text{par}}$ 为悬浮颗粒散射造成的 MTF, $R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}$ 为湍流散射造成的 MTF。其中, $R_{\text{MTF}}^{\text{par}}$ 和 $R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}$ 可分别表示为^[15,17]

$$R_{\text{MTF}}^{\text{par}}(\psi, r) = \exp\left\{-cr + br\left[\frac{1 - \exp(-2\pi\theta_0\psi)}{2\pi\theta_0\psi}\right]\right\}, \quad (10)$$

$$R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}(\psi, r) = \exp(-S_n\psi^{5/3}r), \quad (11)$$

式中 ψ 为空间频率, r 为成像距离, c 为衰减系数, b 为散射系数, θ_0 为平均散射角, S_n 为与湍流耗散率有关的结构函数。根据(10)式和(11)式,分别计算悬浮颗粒散射和湍流散射造成的 MTF,进而分析悬浮颗粒散射和湍流散射带来的影响。图 7 中水体衰减系数为 0.7 m^{-1} , 进水口流速 1 m/s, 以此为例分析悬浮颗粒散射和湍流散射的影响。

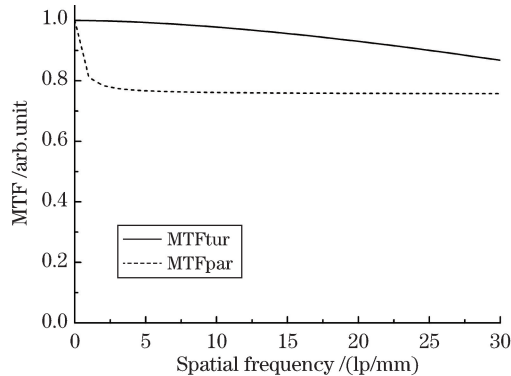


图 7 进水口流速为 1 m/s、水体衰减系数为 0.7 m^{-1} 时, $R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}$ 和 $R_{\text{MTF}}^{\text{par}}$ 曲线

Fig. 7 Curves of $R_{\text{MTF}}^{\text{par}}$ and $R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}$ with 1 m/s inlet flow velocity and 0.7 m^{-1} beam attenuation coefficient

从图 7 可以看出, $R_{\text{MTF}}^{\text{par}}$ 从 $0\sim 3$ lp/mm 区间内迅速下降, 其后的空间频率上几乎不变, 这说明悬浮颗粒散射在整个空间频率区域上造成了调制对比度的下降。悬浮颗粒散射的改变主要体现在水体的衰减系数。从图 6 也可以看出, 当只有衰减系数变化时, MTF 曲线几乎是整体下移的。

湍流散射与悬浮颗粒散射的影响并不相同。从图 7 可以看出, $R_{\text{MTF}}^{\text{tur}}$ 随着空间频率的增加而下降, 其在高空间频率区域的下降程度超过低空间频率区域。从图 5 可以看出, 当进水口处的流速改变时, MTF 曲线并非均匀下降, 流速越大, MTF 曲线在高空间频率区域下降越快。这是因为当湍流强度增加时, 折射率的变

化更强烈,成像光子偏离路径的概率越高,带来更多的图像失真,以及失去更多的图像细节。

在图 8 中,数据点为实验结果,实线为理论模型的结果。可以看出,在大于 10 lp/mm 的高空间频率区域,仿真和实验的结果基本吻合,而在小于 10 lp/mm 的低频区域,理论和实验曲线存在一定差异,误差主要是由于实验过程中气泡团造成的。气泡来自于湍流产生装置,气泡量随着湍流强度的增加而增加,且在湍流场中随机存在。多个大气泡组成的气泡团会给计算结果带来较大的影响,特别是对低频率区域。为了抑制气泡团的影响,使用叠加算法,即在当湍流充分发展时,在 3 s 时间内对一种线对数目标连续采集 50 张图,将其按照对应像素叠加并取平均值。理论模型和实验结果均具有相同的规律,说明理论模型能够较好地描述实验结果。

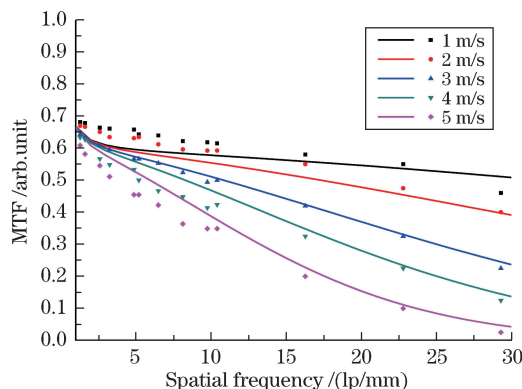


图 8 理论模型与实验结果的 MTF 对比

Fig. 8 MTF comparison of theoretical model and experimental data

从以上分析可以看出,实验的理论模型可以较好地描述湍流对成像造成的影响。湍流环境中水下成像系统分辨率的下降由悬浮颗粒散射和湍流散射共同决定。悬浮颗粒散射在整个空间频率上造成调制对比度的下降;湍流散射在高空间频率域其 MTF 曲线下降的程度更明显,即在较高的空间频率域,湍流散射对成像的分辨能力容易产生影响。因此,湍流环境下的成像,图像失真和分辨率的下降是由悬浮颗粒散射和湍流散射共同造成的。

4 结 论

通过改变水体衰减系数以及进水口处的水流速度,得到湍流环境下的成像结果。计算 MTF 并通过研究成像系统的总 MTF,分析了影响成像质量的主要因素。

当水体浑浊度不发生变化时,系统总的 MTF 曲线随着水流速度的增加而呈现下降趋势,且其衰减的趋势很快;当水体浑浊度改变时,随着衰减系数的增加,同一流速下的 MTF 曲线衰减的越快。说明进水口处流速和水体的衰减系数越大,在湍流场影响下的成像系统的分辨能力越差,系统的成像结果将会丢失更多的细节。

在湍流环境下,水下成像系统的分辨率下降由悬浮颗粒散射和湍流散射共同决定。在整个空间频率上,悬浮颗粒散射会造成调制对比度的下降;而湍流散射会在空间频率较高的区域造成调制对比度明显下降,并且随着水流速度的增加 MTF 曲线幅值下降更迅速。

参 考 文 献

- 1 Zhu X M, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293-1300.
- 2 Stephen B. Turbulent Flows[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 3 Prandke H, Stips A. Microstructure profiler to study mixing and turbulent transport processes[C]. Oceans '98 Conference Proceedings, 1998(1): 179-183.
- 4 Osborn T R. Vertical profiling of velocity microstructure[J]. Journal of Physical Oceanography, 1974, 4(1): 109-115.
- 5 Wei Hao, Wu Jianping, Zhang Ping. Application research on ocean turbulence model[J]. Journal of Ocean University of

- Qingdao, 2001, 31(1): 7-13.
- 魏 皓, 武建平, 张 平. 海洋湍流模式应用研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 7-13.
- 6 Goodman L, Levine E R, Lueck R G. On measuring the terms of the turbulent kinetic energy budget from an AUV[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(7): 977-990.
- 7 Kocsis O, Prandke H, Stips A. Comparison of dissipation of turbulent kinetic energy determined from shear and temperature microstructure[J]. Journal of Marine Systems, 1999, 21(1): 67-84.
- 8 Wei Chuanjie, Yu Fei, Guo Jingsong, *et al.* Analysis of characteristics of ocean turbulence of seasonal change in the western Huanghai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 166-171.
- 魏传杰, 于 非, 郭景松, 等. 黄海西部海洋湍流的季节变化特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 166-171.
- 9 Burchard H. Applied turbulence modelling in marine waters[M]. Berlin: Springer, 2002.
- 10 Thorpe S A. The turbulent ocean[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- 11 Wu lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Study on aero-optical distortion simulation of high refraction index gradient regions in hypersonic turbulent flow[J], Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 2952-2957.
- 吴 琳, 房建成, 杨照华. 高超声速湍流流场高折射率梯度区域气动光学畸变仿真研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 2952-2957.
- 12 Qian Xianmei, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Selection of C_n^2 between phase screens for simulating laser propagation along an inhomogeneous turbulent path[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1856-1860.
- 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 非均匀湍流路径光传播数值模拟中相位屏间 C_n^2 的选取[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1856-1860.
- 13 Luo Xi, Li Xinyang. Investigation on atmospheric optical turbulence profile statistical mode by stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901003.
- 罗 曦, 李新阳. 随机并行梯度下降算法拟合大气湍流廓线统计模式的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901003.
- 14 Zhang Caiyun, Weng Ningquan, Gao Hui, *et al.* Research and theoretical simulation on the optical wave refractive index structure constant using wind profile radar[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301004.
- 张彩云, 翁宁泉, 高 慧, 等. 基于风廓线雷达的光波段折射率结构常数方法研究与理论仿真[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301004.
- 15 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.
- 16 Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang, Xu Chunxiao. Turbulence theory and simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 17 Hou W L. A simple underwater imaging model[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2688-2690.