

文章编号:1001-5078(2024)10-1586-08

· 红外技术及应用 ·

## 红外光透水雾全息成像研究

王刚<sup>1</sup>, 张永安<sup>1</sup>, 黄俊豪<sup>1</sup>, 刘德发<sup>1</sup>, 张亚萍<sup>1</sup>, 高梓欣<sup>1</sup>, 刘文杰<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明荣者光电科技发展有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 本文提出一种在水雾环境下进行全息成像的方法。该方法采用波长处于“大气窗口”的红外激光器, 通过实验模拟出雾气环境, 以探究不同雾气浓度对红外光的全息成像效果影响, 并设置可见光数字全息实验作为对比。通过对比红外光与可见光重建图像的不同图像质量评估参数, 结果表明该系统红外光可清晰成像, 而可见光数字全息系统则成像效果不佳。此外, 由于红外光透水雾全息重建像受零级与散斑影响严重, 本文对得到的全息图重建像进行零级与增强 Lee 滤波去噪声处理, 以达到改善图像质量的目的。

**关键词:** 红外数字全息; 图像增强; 雾气环境; 增强 Lee 滤波

**中图分类号:** TN219; TB877 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.012

### Research on infrared light fog-permeable holographic imaging

WANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Yong-an<sup>1</sup>, HUANG Jun-hao<sup>1</sup>, LIU De-fa<sup>1</sup>, ZHANG Ya-ping<sup>1</sup>, GAO Zi-xin<sup>1</sup>, LIU Wen-jie<sup>2</sup>

(1. School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Kunming Rongzhe Optoelectronics Technology Development Co., Ltd., Kunming 650000, China)

**Abstract:** In this paper, a holographic imaging method in a water mist environment is proposed. Firstly, an infrared laser with a wavelength in the “atmospheric window” is adopted, and the fog environment is simulated through experiments to investigate the effect of different fog concentrations on the holographic imaging effect of infrared light, and set up a visible light digital holography experiment for comparison. By comparing different image quality evaluation parameters of the reconstructed images of infrared light and visible light, the results show that the system can be clearly imaged by infrared light, while the visible light digital holography system has poor imaging performance. In addition, since the holographic reconstruction of infrared light through water mist is seriously affected by the zero level and scattering, the hologram reconstruction obtained in this paper is processed by eliminating the zero level and enhancing Lee filtering to remove the noise, in order to achieve the purpose of improving the image quality.

**Keywords:** infrared digital holography; image enhancement; foggy environments; refined Lee filtering

### 1 引言

数字全息技术可以实现全息图像的数字存储、传输和处理, 能够对全息图像进行多维、多角度、多波长的分析和重构, 广泛地应用于形变应力测量、无

损检测、显微全息、医疗诊断等众多领域<sup>[1-5]</sup>。一般数字全息通常使用可见光作为相干光源, 将可见光源替换为红外光, 即为红外数字全息技术。红外全息技术相比可见光数字全息, 红外光波长更长, 能够

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. 62275113) 资助。

**作者简介:** 王刚 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外全息成像与检测及数字图像处理技术。E-mail: 3110499023@qq.com

**通讯作者:** 张永安 (1965 -), 男, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为全息及光信息处理技术。E-mail: 1295720542@qq.com

**收稿日期:** 2024-02-10

在衍射过程中透过空气中的微粒,且具有大视场物体检测能力和更强的抗扰动特性<sup>[6]</sup>。

红外全息技术的研究与应用近些年得到逐步发展。在生物医学方面,Evangelia Vezouviou 等人利用近红外光特性,利用红外全息技术实现血液葡萄糖浓度的实时监测<sup>[7]</sup>。在工业检测领域,Georges MP 等人利用长波红外全息对航天航空部件进行无损检测<sup>[8]</sup>; Qu Weijuan 等人进行检测硅片表面材料的缺陷<sup>[9]</sup>。在建筑学方面,Pasquale Poggi 等人利用红外光大视场的特性应用中红外全息检测技术对建筑震荡模式进行研究<sup>[10]</sup>。国内昆明理工大学陈强坤等人利用部分红外光可被水分吸收的特性研究红外数字全息的水分含量检测方法,应用于珍贵药材水分的检测<sup>[11]</sup>。

除了上述的研究,红外光还具备能够在衍射过程中绕过微粒的特征,这一特性可将红外全息技术用于透烟雾成像。Locatelli、Pietro 等人将红外数字全息应用于火场搜救<sup>[12-16]</sup>,此方法可以探测火场内被困人员,规避了传统热成像技术的缺点,具有广阔的应用场景。针对透烟雾红外全息成像质量较差的问题,南京邮电大学刘宁团队研究了红外数字全息图像增强关键技术<sup>[17]</sup>,整体提高了红外全息重建像的质量;昆明理工大学赵丹露等提出了一种基于麻雀算法的透烟雾红外数字全息像的亮度增强复合算法<sup>[18]</sup>,解决了透烟雾红外全息重建像亮度分布不均的问题。

基于红外光具有能够衍射绕过空气中的气溶胶颗粒的性质,目前主要的研究聚焦于透过固体微粒的烟雾环境成像,而红外全息同样能够透过液态微粒如水雾环境下成像。相比于红外光全息技术,可见光全息在雾气环境下时,其可见光易被雾气中的液态颗粒吸收与散射,无法有效成像。针对可见光在水雾环境下成像效果不佳的问题,本文由此提出了红外光透水雾全息成像的方法。本方法以自制水雾气室模拟水雾环境,分别以红外光和可见光作为光源对待测物体进行成像,分析不同浓度水雾分别对可见光与红外光全息成像的影响。通过对比不同的图像评价指标数据的,结果表明在同等水雾浓度下,红外光的全息成像效果均比可见光效果更好。在图像增强方面,通过分析透水雾的红外全息图重建像,可以发现其目标物的重建像受零级像影响,且散斑噪声严重。本文将进行消零级与增强 Lee 滤波降噪处理,以达到图像增强效果,实现对透水雾红外

数字全息图重建像的优化。

红外光数字全息技术的透水雾成像方法可以保证透雾成像质量,且便捷程度与可视化程度都有了很大的提高,可有效弥补传统方法的缺点。该方法能够针对以上问题提供良好的解决方案,拓展了红外全息技术的应用场景。

## 2 基本原理

### 2.1 红外光透水雾全息实验装置

如图 1,实验光路包括:红外激光器、可见光激光器、分束镜、扩束镜、针孔滤波器、透镜、快门、全反镜、红外 CCD、水雾产生装置、计算机。待测目标如图 2 所示为半径 2 cm 的纪念奖牌。红外光激光器与可见光激光器分别是中心波长为 1064 nm 与 532.8 nm 的半导体激光器,它们都在连续模式下工作。所述的红外激光器的型号为 MIL-III,最大可调功率为 115.3 mW,光束发散角为 1.5 mrad,相干长度为 20 cm。分束镜 1 与分束镜 2 分光比为 1:1,滤波所用的针孔直径为 15  $\mu\text{m}$ ,CCD 分辨率为 1920  $\times$  1080,型号为 QHY5III290,像素尺寸 2.9  $\mu\text{m}$ ,可接收本实验红外光与可见光波长。

以可见光激光器作为引导,红外激光器经过分束镜 1 分束后分别为参考光束和物光束;参考光束经过全反镜反射后,依次经过扩束镜 2、针孔滤波器 2 和透镜 2 成为平行光束;该平行光束到达分束镜 2。物光束依次经过扩束镜 1、针孔滤波器 1、透镜 1 成为平行光束,穿过模拟生成的水雾气室,照射到待测目标表面产生漫反射,反射的光束到达分束镜 2,两束光相互干涉产生干涉全息图,然后将干涉全息图传递至红外 CCD,再传至计算机,由计算机完成再现过程并实时显示。

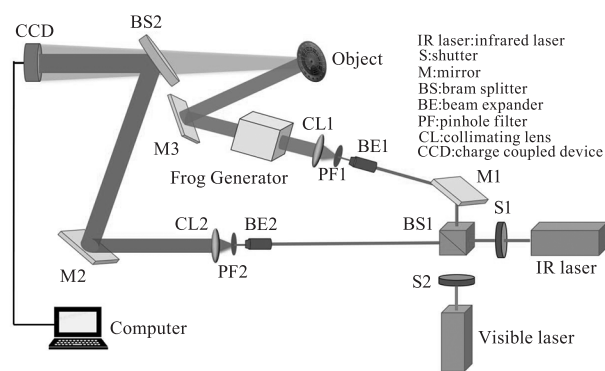


图 1 透水雾全息成像实验装置

Fig. 1 Through the water mist holographic imaging experimental setup



图2 透水雾全息成像物体

Fig. 2 Transparent mist holographic imaging objects

## 2.2 红外光透水雾全息成像技术原理

在红外光全息成像的过程中,激光源被分为物光和参考光,在 CCD 上形成干涉图案,然后用计算机进行重现。全息平面上的物光波  $O(x,y)$  与参考光波  $R(x,y)$  干涉后全息平面上全息图的强度分布为:

$$I(x,y) = |R(x,y) + O(x,y)|^2 \\ = |A_0(x,y)|^2 + |A_r(x,y)|^2 + 2A_0(x,y) \cdot A_r(x,y) \cos[\varphi_0(x,y) - \varphi_r(x,y)] \quad (1)$$

式中,  $A_0$  与  $A_r$  分别为物光波与参考光波的振幅;  $\varphi_0(x,y)$  与  $\varphi_r(x,y)$  分别为物光波与参考光波的相位。式中前两项代表零级衍射,第三项代表实像和共轭像,这是物光和参考光的干涉部分,包含物光的全部振幅和相位信息,在重建像中为 +1 级和 -1 级。

根据菲涅尔衍射原理和再现距离,再现面上的光场分布  $U_I(x_I, y_I)$  为:

$$U_I(x_I, y_I) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \iint_{-\infty}^{\infty} I(u,v) C(u,v) \cdot \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(x_I - u)^2 + (y_I - v)^2]\right\} dudv \\ = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \iint_{-\infty}^{\infty} I(u,v) C(u,v) \exp\left[\frac{jk}{2d}(u^2 + v^2)\right] \exp\left[-j2\pi \frac{1}{\lambda d}(ux_I + uy_I)\right] dudv \quad (2)$$

数字全息的再现过程是通过计算机对含有物光  $O(x,y)$  和共轭参考光  $R(x,y)$  的公式(1)的第三项作傅里叶变换与逆傅里叶变换重构得到光场  $U_I(x_I, y_I)$ , 当物、参光的夹角足够大时,在再现光场上 0 级, +1 级和 -1 级可以被分离开。上式中  $\lambda$  为红外激光波长,  $d$  是物体到全息图平面的距离,  $k = 2/\lambda$ 。

红外光能够穿透水雾成像的原理是红外光穿透

水雾时遵从米氏散射(Mie Scattering)。这种散射是由于大气中存在各种大小的微粒,例如烟雾、灰尘、雾滴和气溶胶等引起的。这些微粒的直径有很大的差异,雾滴的直径一般在  $5 \sim 100 \mu\text{m}$  之间,而固体气溶胶的直径则在  $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$  之间<sup>[19]</sup>。

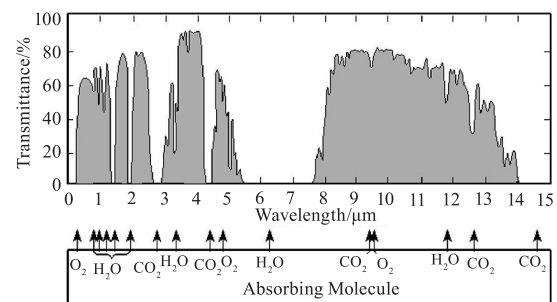
米氏散射与瑞利散射有所不同,它向光线前进的方向更强烈地散射,有明显的方向性。当微粒的直径较大时,米氏散射近似为夫琅禾费衍射。

红外激光在传播过程中,当粒子尺度  $a$  满足条件:

$$a = \frac{2\pi r}{\lambda} > 0.3 \quad (3)$$

时或是遇到与它波长相当的粒子时发生的散射,散射服从 Mie 散射<sup>[20]</sup>。水雾中的粒子散射服从 Mie 散射理论,因为水雾粒子的半径  $r$  在  $5 \sim 100 \mu\text{m}$  之间,而红外激光器的中心波长为  $1.064 \mu\text{m}$ , 满足 Mie 散射的条件,所以红外激光在水雾中的传播受到的散射影响较小。

当光线在空气中传播时,空气中的水蒸气和二氧化碳对不同波长的光有不同程度的吸收作用,图 3 所示为不同波长光大气透过率,曲线表明大气层在一定条件下对部分红外光波段的透过率可达 80% 以上。本实验所选用的  $1064 \text{ nm}$  波长红外激光器位于大气吸收系数较低的短波红外光位置,整体透过率与对比参考的  $532.8 \text{ nm}$  的可见光均超过 60%, 避免了不同波长光被水蒸气吸收率差别较大而导致的误差。

图3 大气在不同光波长范围内的透射光谱<sup>[21]</sup>Fig. 3 Transmission spectra of the atmosphere in different wavelength ranges of light<sup>[21]</sup>

## 3 透水雾全息图像采集及重建

在本实验中,水雾环境是一个非理想、不均匀的粒子场,并且实验装置中设置水雾存储空间并非完全密闭,水雾充满容器后时间不到 10 s 就会完全消散,因此很难实现动态的实时水雾浓度记录。为对

一个相对较完整周期水雾变化下的红外全息图做记录,在光学装置不变动的前提下启动水雾加湿器后,将容纳水雾的容器完全充满,模拟水雾环境。从水雾完全充满到自然消散的过程中,设置红外 CCD 采集全息图间隔时间 0.5 s,于水雾充满时采集 1 张全息图样本,关闭水雾加湿器,在水雾消散的过程中连续采集了 15 张红外全息图样本,时长共 7.5 s。文中将选取水雾连续变化中的 4 张红外全息图进行重建,分别选取 0 s,1 s,3 s 时的全息图,分别对应为高浓度,中浓度,低浓度时的全息图。待水雾散尽后,再采集一张全息图作为无水雾时的全息图。作为对比,更换波长为 532.8 nm 的可见光激光器进行实验,调节合适的距离和夹角,并按以上步骤再次采集作为对比实验。为减小误差,红外光与可见光分别采集 5 组全息图,选取其中 1 组成像效果好的全息图进行研究。

图 4 为可见光与红外光分别在不同浓度与无水雾环境下的全息图局部放大图。由图可知,其他条件与参数相同的条件下,在无水雾的环境,红外和可见光的全息图都可较为明显观察到条纹。当水雾的浓度为高时,可见光不仅对比度降低,光强也被较大削弱;而红外光虽然光强下降比较明显,却依然有比较清晰的条纹;水雾浓度比较低时,红外光的条纹清晰,对比度与亮度与无水雾时几乎没有变化,此时可见光可观察到些许条纹,但强度与对比度均有一定下降。从全息图的条纹可以看出红外光穿透水雾时所受的影响更小。

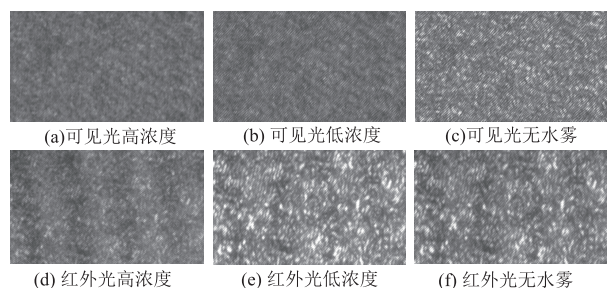


图 4 红外光与可见光在不同水雾浓度下全息图的局部放大图

Fig. 4 Local magnification of holograms of infrared light and visible light at different water mist concentrations

图 5、图 6 分别是可见光和红外光在不同水雾浓度环境下的重建像。当水雾浓度高时,从重建图的零级可以看出,可见光重建像强度被严重削弱,而红外光重建图像虽然强度有所降低,但红外光的重

建像 -1 级依然清晰;中低水雾环境下,可见光重建像强度根据水雾浓度大小被不同程度削弱,红外光重建像清晰,轮廓明显,与无水雾环境下的重建图像基本相同。通过对比不同水雾浓度下的红外和可见光重建像,证明了水雾环境下红外光相比可见光透过率更高,在水雾环境下的实用性更强。

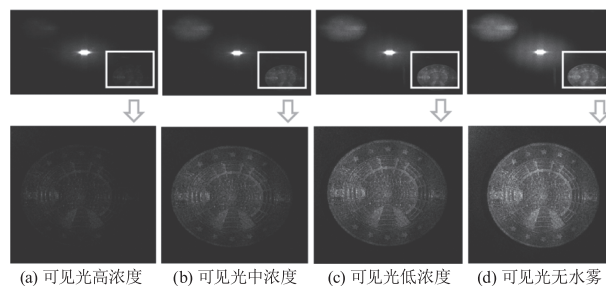


图 5 可见光在不同水雾浓度环境下的重建像

Fig. 5 Reconstruction image of visible light under different water mist concentration environments

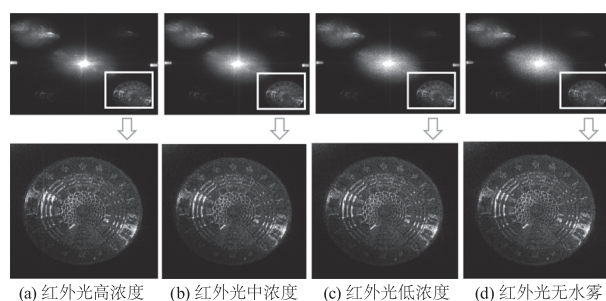


图 6 红外光在不同水雾浓度环境下的重建像

Fig. 6 Reconstruction image of infrared light under different water mist concentration environments

通过实验模拟出具有雾气的场景,探究不同雾气浓度分别对红外光的全息成像影响,比较全息图和还原像的图像质量,证明了红外光透水雾全息的有效性。通过对比波长为 532.8 nm 的可见光数字全息,实验结果显示,红外光能够在高浓度水雾中清晰地显示物体的轮廓,而可见光则受到水雾的严重衰减,无法得到清晰的图像。这说明红外光具有透水雾的能力,可以用于非理想环境下的检测。因为模拟的水雾环境距离较短,可见光仍然有部分透过水雾环境成像,不能完全反映出红外光与可见光在长距离目标成像下的不同。

#### 4 重建像质量评估与图像处理

##### 4.1 重建图像质量评估与数据分析

通过以上肉眼的主观质量评估后,为了从数据层面更深入地验证红外光透水雾成像效果,本文引入几种不同的图像质量评估标准。分别为均方误差

MSE (Mean Square Error)、峰值信噪比 PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)、结构相似度 SSIM (Structure Similarity Index Measure) 和特征相似度指数 FSIM (Feature Similarity Index Measure)。

MSE 将真实图像和预测图像的每个像素的差值平方,然后求和,再除以像素总数,得到一个非负数。MSE 值越接近零,表示图像越相似。PSNR 在给定一个大小为  $m \times n$  的灰度图  $I$  和噪声图  $K$ ,均方误差 MSE 公式的前提下进行计算,其单位为 dB,PSNR 值越大,图像失真越少。SSIM 将两个图像划分为多个区域,然后分别计算每个区域的亮度、对比度和结构相似性,再加权求和,得到一个在  $-1$  和  $1$  之间的数值,SSIM 值越接近  $1$ ,意味着图像越相似。

FSIM 主要利用特征相似性 (Phase Congruency, PC) 进行质量评价,并使用梯度特征 (Gradient Magnitude, GM) 来弥补,同时中使用了 PC 和 GM 两个特征互为补充。

用红外光和可见光分别对不同水雾浓度重建结果的照片计算评价参数 MSE、PSNR、FSIM 和 SSIM。将水雾从充满至消散的过程中每隔  $0.5$  s 用红外光采集的 16 张全息图进行重建并采取  $-1$  级像,总用时  $7.5$  s。以无水雾环境下的全息重建像  $-1$  级作为对比参考的对象,分别计算 16 组 PSNR、MSE、FSIM 和 SSIM 值。作为对比,同样重建并计算 16 组可见光的 PSNR、MSE、FSIM 和 SSIM 值。结果如下表所示。

表 1 不同水雾浓度红外光还原图像质量评价参数比较

Tab. 1 Comparison of image quality evaluation parameters of infrared light reduction with different water mist concentrations

Evaluation Indicators	$t=0$ s	$t=0.5$ s	$t=1.0$ s	$t=1.5$ s	$t=2.0$ s	$t=2.5$ s	$t=3.0$ s	$t=3.5$ s	$t=4.0$ s	$t=4.5$ s	$t=5.0$ s	$t=5.5$ s	$t=6.0$ s	$t=6.5$ s	$t=7.0$ s	$t=7.5$ s
SSIM	0.3528	0.4641	0.6493	0.5844	0.6367	0.6886	0.7083	0.7238	0.7697	0.7785	0.7569	0.8125	0.8188	0.8260	0.8377	0.8558
FSIM	0.9707	0.9777	0.9916	0.9872	0.9906	0.9946	0.9961	0.9955	0.9972	0.9977	0.9977	0.9987	0.9988	0.9988	0.9990	0.9989
MSE	21.4514	16.0651	4.5890	8.3145	4.7137	2.4212	1.3736	1.1571	0.4545	0.3441	0.1593	0.1343	0.1258	0.0789	0.0687	0.0780
PSNR	34.8162	36.0720	41.5136	38.9324	41.3972	44.2905	46.7523	47.4973	51.5552	52.7635	56.1099	56.8495	57.1326	59.1592	59.7610	59.2078

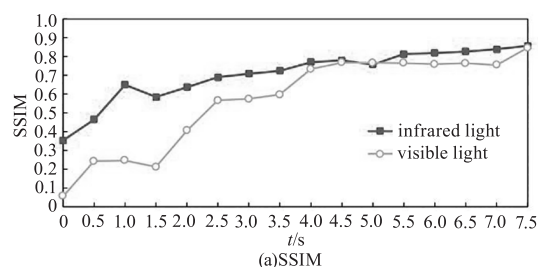
表 2 不同水雾浓度可见光还原图像质量评价参数比较

Tab. 1 Comparison of image quality evaluation parameters of visible light restoration with different water mist concentrations

Evaluation Indicators	$t=0$ s	$t=0.5$ s	$t=1.0$ s	$t=1.5$ s	$t=2.0$ s	$t=2.5$ s	$t=3.0$ s	$t=3.5$ s	$t=4.0$ s	$t=4.5$ s	$t=5.0$ s	$t=5.5$ s	$t=6.0$ s	$t=6.5$ s	$t=7.0$ s	$t=7.5$ s
SSIM	0.0571	0.2431	0.2460	0.4051	0.2120	0.5666	0.5736	0.5965	0.7325	0.7672	0.7667	0.7643	0.7591	0.7632	0.7542	0.8458
FSIM	0.8800	0.9386	0.9385	0.9638	0.9326	0.9718	0.9300	0.9800	0.9978	0.9981	0.9985	0.9983	0.9970	0.9962	0.9984	0.9975
MSE	111.2883	65.6065	64.0191	33.1385	68.8052	32.3671	23.2281	17.7246	0.9083	0.6836	0.3658	0.5244	1.0642	3.6918	0.4448	0.9137
PSNR	27.6663	29.9613	30.0677	32.9275	29.7546	33.0298	34.4707	35.6450	48.5487	49.7825	52.4985	50.9341	47.8607	42.4585	51.6487	48.5226

对表 1 和表 2 中的数据进行分析研究,通过对采集的全息图的还原图的评价参数,水雾从充满到消散的过程中,还原图越来越接近无水雾时的全息图。在整个过程中,红外光的 MSE 与 PSNR 值均优于可见光,即使有个别数据存在误差,也并不影响其结果。同样的结论也适用于 FSIM 和 SSIM 值,过程中 FSIM 与 SSIM 值大部分情况下更接近于  $1$ ,特别是在高水雾浓度下红外光的优势更为明显。这表明在同样的水雾浓度下,即使红外光会被水蒸气部分吸收,红外光的还原图强度衰减程度依然更小,且可较好的保持图像的原有的结构,与未加水雾重建图

像相似度更高。为了更明显的体现出红外光的优势,作折线图如图 7 所示。从图 7 可以看出在不同的图像质量评价参数下,红外光均全面优于可见光,特别是在较高水雾浓度下优势更为明显。



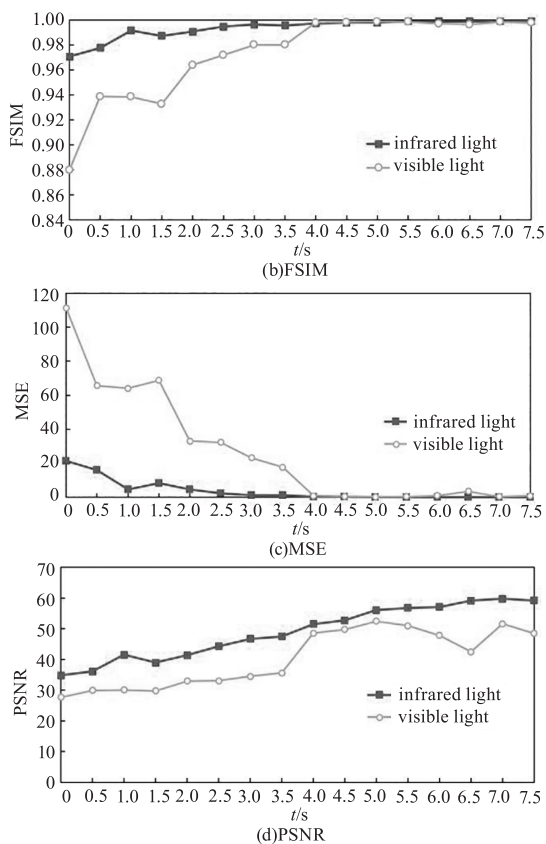


图7 不同水雾浓度下红外光与可见光各评价参数对比  
 Fig.7 Comparison of evaluation parameters of infrared light and visible light under different water mist concentrations

#### 4.2 全息重建像增强

在红外光数字全息重建过程中,零级衍射问题是一个主要的挑战。这个问题主要是由红外 CCD 的大像素尺寸和低空间分辨率造成,它对数字全息图的重建质量产生了严重影响。零级衍射的能量非常大,它占据了光谱域的中心位置。

本实验拍摄全息图的调整合适的拍摄距离与光束夹角,使得重建像的“0”级像、“+1”级像和“-1”级像完全分离,因此选取频谱滤波法作为消除“0”级像与“+1”级像的方法。频谱滤波法需要选择合适的滤波窗口,并且载波的频率需要大于拍摄目标的最高频率的三倍<sup>[22]</sup>。图8是相关处理结果,选取高浓度水雾环境下的红外光全息重建像,通过频谱滤波法频域滤波法处理后其他级次的像被完全消除。

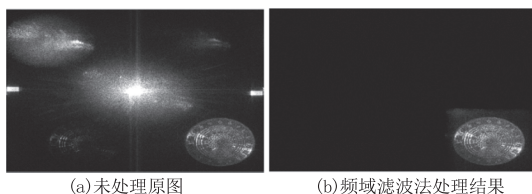


图8 零级像处理结果

Fig.8 Zero-level image processing results

红外激光器的因为其强相干性,使得透过或者反射被测样品粗糙表面的光波进行随机叠加,在记录平面产生颗粒状的“激光散斑”现象<sup>[23]</sup>。散斑噪声会使得全息图像的质量明显降低,为提高红外光透水雾全息成像的可用性,本文采用增强 Lee 滤波器对重建图像进行去噪。普通 Lee 滤波算法是居于均质区域设计得到的,所以在边缘细节方面处理不善。本文采用增强的 Lee 滤波在 Lee 滤波的基础上引入了自适应参数,以更好地适应不同噪声环境下的图像,在保留图像边缘细节的同时能更好地减少噪声。

将消零级后的还原图提取“-1”级,对“-1”级还原图进行增强 Lee 滤波处理。如图9所示,增强的 Lee 滤波处理后,图像背景中的散斑噪声被很好地消除。同时对比 Lee 滤波与 NL-mean 滤波算法,对重建图像进行处理后,发现上述算法处理后会使得图像模糊,边缘细节信息丢失严重。

为了客观评估不同算法的优劣,本文通过对比散斑抑制指数 SSI (Speckle Suppression Index) 和散斑抑制与平均保持指数 SMPI (Speckle Suppression and Mean Preservation Index) 以评价不同算法的降噪效果,同时使用结构相似度指数 SSIM (Structure Similarity Index Measure) 来评价图像保存的完整性。SSI 表示去噪图像和含噪图像噪声之间的比率,越小散斑噪声抑制效果越好;SMPI 在 SSI 的基础上考虑了降噪后的图像和降噪前的图像之间的均值差异,较小的 SMPI 值表示在均值保持和降噪方面滤波器具有更好的性能。评价结果如表3所示,由表3可知增强 Lee 滤波后 SSI 和 SMPI 值小于其他滤波方法,说明其在去噪能力方面有更好的性能,同时增强 Lee 滤波的 SSIM 值也比其他滤波方法更高,其在保持图像结构完整性上具有更好的性能。结合图9与表3可知,增强 Lee 滤波不仅能够很好地滤除散斑噪声,同时保持了较好的图像原本细节,边缘清晰锐利,与其他算法相比较效果更好。

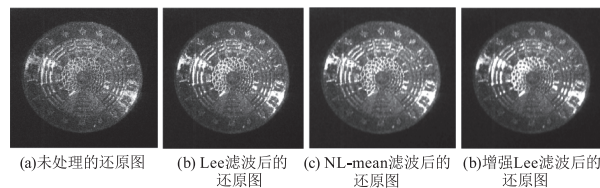


图9 不同滤波器对重建图像进行降噪处理

Fig.9 Different filters denoise the reconstructed image

表3 不同滤波方法的噪声抑制能力评估  
Tab.3 Evaluation of noise suppression ability of different filtering methods

Method	Evaluation index		
	SSI	SMPI	SSIM
Refined Lee filtering	0.3690	0.3713	0.7563
Lee filtering	0.4507	0.4507	0.3944
NL-mean filtering	0.7131	0.7001	0.2924

## 5 结论

本文提出了一种红外光透水雾数字全息成像的方法,该方法结合了红外和数字全息技术,以在水雾环境下对物体进行清晰的成像。此方法利用红外光透过水雾的特性,与数字全息技术的优势相结合,以达到穿透水雾进行高质量的全息成像的效果。为了验证该方法的有效性,进行一系列实验,分别对比了红外光和可见光在水雾环境下的全息成像效果。实验结果表明,在不同水雾浓度下,红外光的全息成像效果无明显变化,而可见光的重建像质量随着水雾浓度的增加逐渐变差,在高浓度水雾环境下基本已经不可用。另外通过对比不同的图像评价指标数据,红外光透水雾的全息重建像质量均优于可见光。本文通过实验与数据分析证明了红外光全息技术的优越性,以及其在透雾、实时显示、可视化等方面的优点。同时实验中依然存在一些影响成像效果的因素,例如红外全息重建像零级明显,散斑噪声可能会影响成像效果等,为了提高成像的质量和实用性,可通过不同的方法消除零级和散斑的干扰。总的来说,本文提出了一种新的红外光全息成像方法,利用红外光和数字全息技术在水雾环境下对物体进行成像,进一步拓展了红外全息技术的应用场景。

## 参考文献:

- [1] Chikode Prashant P, Vhtkar Rajiv S, Patil Soudip D, et al. Investigations of defects in ceramic tiles using Double Exposure Digital Holographic Interferometry (DEDHI) technique [J]. *Optik*, 2020, 219: 165035.
- [2] Zhou Wenjin, Li Anqi, Chen Zhengkai, et al. Defects detection and analysis of mural by using digital [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1909001. (in Chinese)  
周文静, 李安琦, 陈振凯, 等. 壁画文物缺陷数字全息检测与分析 [J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1909001.
- [3] Fan Meixia, Zhang Yongan, Li Zhongfang. Application of reflecting real-time digital holography in thermal stress field of rock [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 502505. (in Chinese)  
范美霞, 张永安, 李忠芳. 反射式数字实时全息法对岩石应力场的研究 [J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 502-505.
- [4] Liu Yakun, Xiao Wen, Che Leipin, et al. Cancer cell vacuolization imaging based on digital holographic microscopy tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022(49): 1-11. (in Chinese)  
刘雅坤, 肖文, 车蕾平, 等. 基于数字全息显微层析的癌细胞空泡化成像研究 [J]. *中国激光*, 2022(49): 1-11.
- [5] José Luis Silva Acosta, Fernando Mendoza Santoyo, Jorge Mauricio Flores Moreno, et al. Study of skin aging effects-induced by near UV radiation using time average digital holographic interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106345.
- [6] Liu Wanli. Research on infrared holographic detection technology [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019: 4-6. (in Chinese)  
刘万里. 红外全息检测技术的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019: 4-6.
- [7] Vezouviou E, Lowe C. R. A near infrared holographic glucose sensor for diabetes management [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 68: 371-381.
- [8] Georges M P, Cédric Thizy, Languy F, et al. An overview of interferometric metrology and NDT techniques and applications for the aerospace industry [C] // SPIE Optical Engineering and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [9] Qu W, Chee O C, Yu Y, et al. Digital in-line holographic microscopy at 1310 nm with superluminescent light-emitting diode broadband source [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2009, 7522.
- [10] Pasquale Poggi, Locatelli M, Pugliese E, et al. Remote monitoring of building oscillation modes by means of real-time mid infrared digital holography [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 23688.
- [11] Chen Qiangshen, Zhang Yongan, Tian Fengxian, et al. Research on moisture content detection method based on infrared digital hologram [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(1): 57-63. (in Chinese)  
陈强坤, 张永安, 田凤仙, 等. 基于红外数字全息的水分含

- 量检测方法研究[J]. 激光与红外,2022,52(1):57-63.
- [12] Locatelli M, Pugliese E, Paturzo M, et al. Seeing through smoke and flames: a challenge for imaging capabilities, met thanks to digital holography at far infrared[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII,2013.
- [13] Locatelli M, Pugliese E, Paturzo M, et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography [J]. Optics Express, 2013, 21 ( 5 ) : 5379 - 5390.
- [14] Ferrar O, Pietr O. Infrared digital holography as new 3D imaging tool for first responders and firefighters: recent achievements and perspectives [C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics,2014:1-2.
- [15] Bianco V, Paturzo M, Finizio A, et al. Revealing fire survivors hidden behind smoke and flames by IR active imaging systems[C]//2014 International Carnahan Conference on Security Technology (ICGST). IEEE,2014:1-3.
- [16] Bianco V, Paturzo M, Finizio A, et al. Portable IR laser system for real-time display of alive people in fire scenes [J]. Journal of Display Technology,2015,11(10):834-838.
- [17] Yang Chao. Research on key technologies of infrared digital hologram enhancement[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019: 6 - 7. ( in Chinese)  
杨超. 红外数字全息图像增强关键技术研究[D]. 南京:南京邮电大学,2019:6-7.
- [18] Zhao Danlu, Zhang Yongan, He Guanghui, et al. Brightness enhancement algorithm for smoke permeable infrared digital hologram[J]. Chinese Journal of Lasers,2023,50(18):1809001. ( in Chinese)  
赵丹露,张永安,何光辉,等. 透烟雾红外数字全息像的亮度增强算法[J]. 中国激光,2023,50(18):1809001.
- [19] Yang Shuo, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. Preliminary study on particle size determination method of aerosol optical thickness spectroscopy characteristics [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2011, ( 22 ) : 152 - 157. ( in Chinese)  
杨溯,石广玉,王标,等. 气溶胶光学厚度谱特征判断粒子大小方法初探[J]. 应用气象学报,2011,(22):152-157.
- [20] Lai Benlin, Zhang Yongan, Zhang Yapin, et al. Research on stress field detection of building blasting environment based on infrared digital holography [J]. Infrared Technology,2023,(45):102-109. ( in Chinese)  
赖本林,张永安,张亚萍,等. 基于红外数字全息的建筑爆破环境应力场检测研究[J]. 红外技术,2023,(45):102-109.
- [21] Ma Wenwei, Xie Xishun, Zhou Yuqin. Physics. fifth edition [M]. Beijing: Higher Education Press,2006:81-83. ( in Chinese)  
马文蔚,解希顺,周雨青. 物理学. 第五版[M]. 北京:高等教育出版社,2006:81-83.
- [22] Qian Xiaofan. Information optics digital lab [M]. Beijing: Science Press,2015:119-135. ( in Chinese)  
钱晓凡. 信息光学数字实验室[M]. 北京:科学出版社,2015:119-135.
- [23] Niu Rui. Study on speckle noise suppression technology of digital holographic measurement system [D]. Xi'an: Xi'an Technological University,2022:16-18. ( in Chinese)  
牛瑞. 数字全息测量系统的散斑噪声抑制技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2022:16-18.