

## 水下二维及三维距离选通成像去噪技术研究

王新伟<sup>1,2,3</sup>, 孙亮<sup>1</sup>, 王敏敏<sup>1,2</sup>, 杨于清<sup>1,2</sup>, 周燕<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049;
3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

**摘要:** 相比传统水下摄像机, 水下距离选通成像的作用距离可提高两三倍, 同时基于该技术可实现快速高分辨率三维成像, 在水底详查、避障导航、海洋科学研究、矿藏开发等方面具有广泛应用前景。虽然距离选通成像可通过空间切片的方式抑制水体的后向散射噪声, 实现感兴趣区较高质量的成像, 但是, 在选通图像中仍不可避免地存在空间切片水体的后向散射噪声, 导致图像信噪比和对比度降低, 尤其是对于远距离目标或低反射率目标。介绍了针对水下距离选通二维成像及三维成像去噪方面的技术研究。在二维成像方面, 一是采用双平台自适应增强算法提高图像对比度, 更好地满足人眼视觉要求; 二是采用参考水体去噪算法实现含目标图像的水体去噪, 提高信噪比。在三维成像方面, 针对距离能量相关三维成像, 一是利用参考水体去噪算法实现去噪三维重建, 二是采用双边滤波法对三维图像中数据空洞进行修复, 提高三维图像质量。所述四种方法可独立或联合用于水下距离选通成像的去噪增强, 提高水下距离选通成像技术的性能。

**关键词:** 水下成像; 距离选通成像; 三维成像; 距离能量相关; 图像增强; 去噪

**中图分类号:** TN249      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0203002

## Deblurring methods for underwater 2D and 3D range-gated imaging

Wang Xinwei<sup>1,2,3</sup>, Sun Liang<sup>1</sup>, Wang Minmin<sup>1,2</sup>, Yang Yuqing<sup>1,2</sup>, Zhou Yan<sup>1,2,3</sup>

- (1. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronics Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Compared with traditional underwater cameras, the detection distance of underwater range-gated imaging can be increased by 2–3 times. Furthermore, based on this technology, fast high-resolution 3D imaging can be achieved. It has great potentials in underwater target detection and recognition, automatic navigation, marine scientific research and natural resources exploration. Although range-gated imaging can suppress the backscattering noise by space slicing, and achieve higher quality images, the backscattering noise of the sampling water volume still exists in gated images, resulting in low image signal-to-noise ratio and contrast, especially for distant targets or low reflectance targets. This paper systematically introduced author's research of deblurring methods for 2D and 3D range-gated

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61875189); 国家重点研发计划(2016YFC0302503); 中国科学院战略先导项目

作者简介: 王新伟(1982-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光三维成像、水下成像、智能视频监控等方面的研究。

Email: wangxinwei@semi.ac.cn

imaging. In 2D imaging, two methods were proposed: the first was an algorithm of self-adaptive double-plateau histogram equalization to improve image contrast and better meet human vision; the second was to use a water-noise-reference denoising algorithm to improve the signal-to-noise ratio of target gated images. In 3D imaging, there were also two methods proposed: one was to use the water-noise-reference denoising algorithm for 3D reconstruction, and the other was to use the threshold-dependent joint bilateral filter algorithm for enhancing 3D images. The four proposed methods can be used independently or in combination for denoising enhancement of underwater range gated imaging.

**Key words:** underwater imaging; range-gated imaging; three-dimensional imaging; range-intensity correlation; image enhancement; deblurring

## 0 引言

21 世纪, 人类进入了大规模开发利用海洋的时期, 掀起了围绕蓝色国土空间拓展、海床矿产资源勘探、海洋生物及渔业资源评估、海洋天然产物开发、涉海土木工程等新一轮海洋竞争, 归根结底是一个国家海洋实力的竞争, 关键是海洋认知能力的比拼。水下探测是认识海洋的关键技术, 尤其是可直观显示目标形貌的成像技术。相比声呐成像, 水下光学成像可获取直观、高分辨率的图像, 利于海底管线、失事舰船飞机、水下文物、鱼类和浮游动物、渔网、水雷等探测及识别, 具有不可替代性, 现已成为缆控型水下无人潜航器 ROV 的标配, 在自治式水下无人潜航器 AUV 的应用也日益广泛。

水下光学成像不同于大气环境下的光学成像, 需要在高压、强散射、低照度或无光环境下实现远距离、高质量的二维成像和三维成像。但是, 受海水吸收和散射的影响, 传统水下光学成像作用距离通常为 1~3 个衰减长度<sup>[1]</sup>, 且只能获得二维强度图像, 难以获取三维图像。相比传统水下摄像机, 水下距离选通成像的作用距离可提高两三倍<sup>[1]</sup>。事实上, 距离选通成像技术并不是一项年轻的技术, 于 20 世纪 60 年代提出<sup>[2]</sup>, 但是受器件制约, 该技术并未快速形成应用。直到 20 世纪 90 年代, 欧美等国家开始形成装备及产品, 代表性的水下距离选通成像产品是加拿大 DRDC 的 LUCIE 系列<sup>[3-5]</sup>。由于距离选通成像可通过控制激光脉冲和选通脉冲间的延时对感兴趣距离下的空间进行切片成像, 因此, 存在“时间—空间”的映射关系, 利用这种关系可实现三维成像。目前水下距离选通三维成像主要发展了时间切片扫描成像和

距离能量相关三维成像技术。时间切片扫描三维成像的工作原理类似医学 CT 成像, 主要是利用高精度延时步进扫描获得多幅选通切片图像, 实现三维重建<sup>[6]</sup>, 存在数据量大和实时性差的问题。不同于时间切片扫描成像, 距离能量相关三维成像可利用两幅选通图像通过能量与距离的映射关系重建三维空间信息, 解决了实时三维成像的问题, 可获得视频帧频三维图像<sup>[7-8]</sup>。代表性的研究单位有法德圣路易斯研究院、中国科学院半导体研究所、欧盟 UTOFIA 团队等<sup>[9]</sup>。其中, 法德圣路易斯研究院研制了 SeaLVi 系列的水下激光选通成像系统, 并进行了海上试验验证<sup>[10]</sup>; 中国科学院半导体研究所研制了“绿瞳”、“凤眼”和“龙睛”等水下激光三维成像系统, 并搭载 ROV、AUV 和深海着陆器等进行了海上试验验证<sup>[9]</sup>; 欧盟 UTOFIA 团队研制了 UTOFIA 水下激光选通三维成像系统, 也完成了海上试验验证<sup>[11]</sup>。虽然距离选通成像可通过空间切片的方式抑制空间切片与系统间水体的后向散射等噪声影响, 提高了作用距离和图像质量, 但是, 仍然存在以下问题: (1) 空间切片内水体的后向散射噪声仍然会出现在选通图像中, 从而降低图像的信噪比和对比度, 并会降低三维图像的距离分辨率; (2) 在实际应用中, 目标与环境的反射率通常是不一致的, 即使对于同一目标的不同部位的反射率也可能存在较大差异, 这导致图像中会出现高亮度区和低亮度区, 从而影响二维图像的视觉效果, 并会导致三维图像中存在数据空洞; (3) 在极限探测距离下, 目标的回波信号较低, 二维图像信噪比低, 这也会导致三维图像中出现空洞。针对上述问题, 分别开展了针对水下距离选通二维和三维图像的去噪及增强技术的研究, 论文将系统

介绍相关研究的进展情况。需说明的是,在以下内容中涉及的三维成像去噪研究主要是针对三角形距离能量相关三维成像<sup>[8-9]</sup>。

## 1 水下距离选通二维成像去噪技术

### 1.1 双平台自适应增强算法

在距离选通成像水下探测应用中,尤其是远距离成像和水质较差环境下,水体吸收导致激光能量严重衰减,水体后向散射引起目标信噪比降低,且不同距离和不同反射率目标的反射激光能量不同会导致目标亮度不均,不利于人眼观察和目标识别。针对此,笔者所在课题组开展了图像增强技术的研究。

直方图增强作为图像增强处理的一类重要分支方法,在图像处理领域已得到了广泛应用。但是,传统的直方图均衡增强方法会导致图像过饱和和增强和细节丢失问题,不能有效地对选通图像进行增强<sup>[12-13]</sup>。针对上述问题,提出了一种双平台自适应图像增强算法<sup>[14]</sup>,通过自适应设置上限平台阈值抑制像素较多的灰度级(背景和噪声)的过度增强,设置下限平台阈值保护像素较少的灰度级(小目标和细节),防止在增强过程中被其他灰度合并,从而提高图像对比度和亮度,提高可视化和探测距离。

其过程如图 1 所示:首先,对原始图像进行直方图统计获取统计直方图  $h(k)$ ,根据公式(1)对统计直

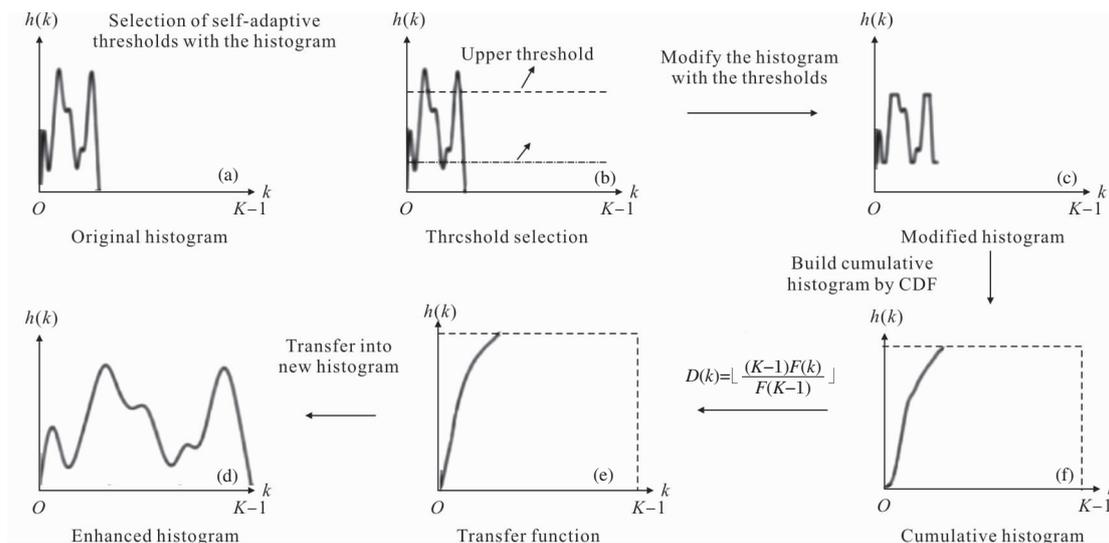


图 1 双平台自适应增强算法

Fig.1 Self-adaptive double-plateau histogram equalization algorithm

方图进行修正得到修正后直方图。

$$H(k) = \begin{cases} T_u & h(k) > T_u \\ h(k) & T_d \leq h(k) \leq T_u \quad (k=0, 1, \dots, K-1) \\ T_d & 0 < h(k) < T_d \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  为灰度值为  $k$  的灰度级;  $K$  为理论最大的灰度值;  $H(k)$  为修正后的灰度直方图函数。当  $h(k)$  大于上限阈值  $T_u$  时,令其等于  $T_u$ ; 当  $h(k)$  不等于零,并小于下限阈值  $T_d$  时,令其等于  $T_d$ ; 当  $h(k)$  介于  $T_u$  和  $T_d$  之间时,不做改变。

利用公式(2)对修正后的统计直方图进行累积,可获取累积直方图 (Cumulative Distribution Function, CDF)  $F(k)$ 。

$$F(k) = \sum_{j=0}^k H(j) \quad (k=0, 1, \dots, K-1) \quad (2)$$

由累积直方图可计算出图像灰度转换方程,如公式(3)所示:

$$D(k) = \lfloor (K-1)F(k)/F(K-1) \rfloor \quad (3)$$

式中:  $D(k)$  为转换后的灰度级;  $\lfloor \cdot \rfloor$  为向下取整。

最后利用转换方程对图像各像素的灰度值进行转换获得增强图像。双平台直方图增强算法中最关键的是上下限平台阈值的选取。人为选取的经验值对某幅或某种场景的选通图像增强效果较好,而对另一幅或另一种场景效果较差。因此,在实际应用中,为了确保双平台直方图增强算法对选通图像进行自适应增强,采用自适应的方法来获得上下限阈

值是十分必要的。

上限阈值用于限制背景噪声,若其值选择过小,则起不到抑制背景噪声过度增强的目的,若其值选择过大,则会抑制目标的增强。选通图像中,目标区域相对于背景噪声区域所占的像素数小很多,因此上限阈值  $T_u$  应该小于背景对应峰值  $h_b(k)$ ,大于目标对应的峰值  $h_T(k)$ ,并且更接近  $h_T(k)$ 。因此上限阈值为统计直方图像素统计数非零灰度级的局部最大值集合的平均值。

下限平台阈值  $T_d$  用于增强原图像的细节信息,这些细节的灰度级的直方图值较小,下限阈值  $T_d$  的选取依赖于与上限阈值  $T_u$  和有效灰度级数目  $L$ ,如公式(4)所示。

$$T_d = \frac{T_u}{\sqrt{L}} \quad (4)$$

图 2 给出了水母二维选通原始图像和增强图像实验结果。从图中可以看出原始图像亮度和对比度低,灰度级分布在 20 以下,传统 HE 直方图增强后

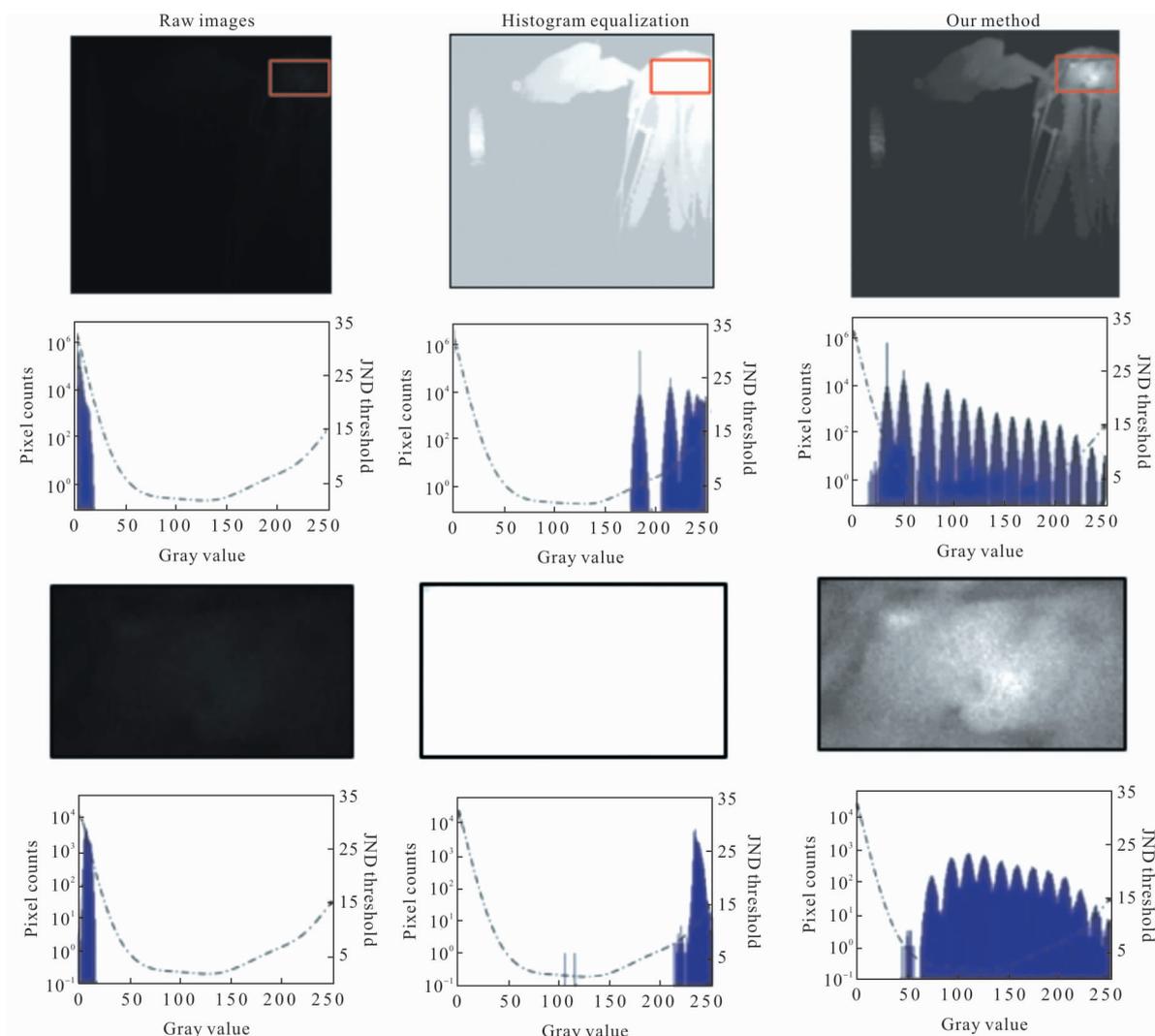


图 2 水母二维选通图像增强结果:第一行是全尺寸图像;第二行是全尺寸直方图;第三行是感兴趣区图像;第四行是感兴趣区直方图  
Fig.2 Enhancement results of 2D gated images of jellyfish: full frame images (first line), histograms of full frame images (second line), ROI images (third line), histograms of ROI images (fourth line)

图像出现过饱和现象,目标细节丢失,灰度级分布在 200 以上,自适应双平台增强后图像灰度等级分布在 0~255,图像对比度和细节得到显著增强。图 3 给

出不同水域条件下不同目标的原始图像和增强图像结果,分别为沈自水池下的浮球和目标靶成像结果,千岛湖湖底和绳子的成像结果,以及大连海域的渔

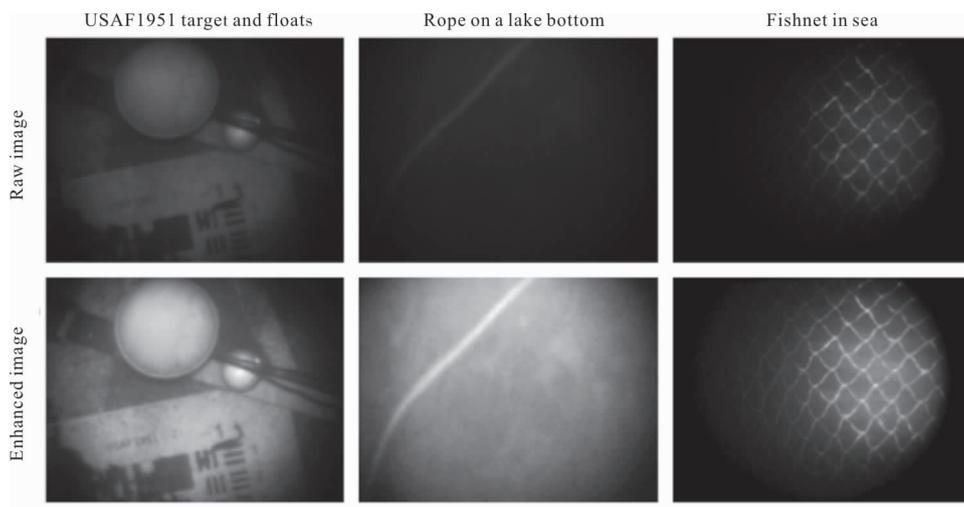


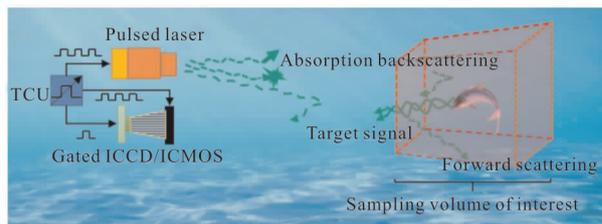
图 3 不同图像双平台自适应增强算法增强效果

Fig.3 Enhancement results of different gated images under self-adaptive double-plateau histogram equalization algorithm

网成像结果。图中第一行是原始图像,从图中可以看到,图像对比度和亮度低,人眼不利于目标发现和区分,目标有效成像区域和细节较少,通过文中算法后,图像对比度和亮度得到明显增强,有效成像区域得到显著提升,同时目标细节得到明显增强,背景噪声得到明显抑制,结果如第二行所示。试验结果表明:文中算法针对不同条件下低对比度和低亮度图像实现自适应目标增强,可有效提高可视化和探测距离。

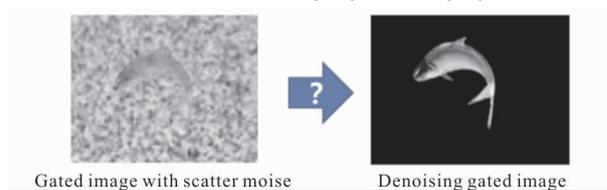
### 1.2 参考水体去噪算法

当光在水下传播时,由于水体介质的吸收和散射作用,会引起成像距离短、质量差的问题。如果只有水的吸收作用,增加光源的亮度或探测器的灵敏度会提高成像距离。而散射则会改变光的传播方向,使一部分光偏离原来的传播方向,其中的后向散射噪声限制了目标和背景的对亮度<sup>[15-16]</sup>,尤其是在远距离成像或者水体比较浑浊的情况下,很难得到高信噪比图像。相比于传统水下光学成像,距离选通成像可通过在时间上同步激光脉冲和选通脉冲抑制感兴趣区和成像系统之间的后向散射等水体噪声,但是感兴趣区域内仍然存在水体噪声,影响二维成像质量,如图 4(a)所示。一般情况下,通过采集和去除感兴趣区域无目标的水体后向散射噪声,可以直接降低后向散射噪声。但是,由于感兴趣区域中往往存在目标,如图 4(a)中的鱼,影响无目标水体后向散射噪声图的采集。为了解决距离选通水下成像受水体后向散射噪声干扰,导致二维切片图像模糊、质量差的问题,提出了参考水体去噪算法,以提高选通图像



(a) 水下距离选通成像

(a) Underwater range-gated imaging



(b) 去水体噪声效果示意图

(b) Motivation of filtering water noise

图 4 水下距离选通成像中的水体噪声

Fig.4 Water noise in underwater range-gated imaging

的信噪比和对比度,如图 4(b)所示。

参考水体去噪算法的流程图如图 5 所示。关闭激光器,采集系统背景噪声图  $I_{background}$ ,包括系统噪声和环境背景噪声。开启激光,采集无目标位置处的参考水体噪声图  $I_{ref}$ ,包括水体后向散射噪声和背景噪声。作差分计算获得水体噪声图,如公式(5)所示:

$$I_{background} = I_{ref} - I_{background} \quad (5)$$

根据光在水中的传播特性<sup>[17-18]</sup>,在距离成像系统  $R$  处,选通图像中的后向散射噪声表示为:

$$I_b(x, y) = \int_{R_2}^{R_1} \int_0^\pi \frac{BI_l}{8\pi} (1 + g \cos \theta) \sin \theta \frac{fc^{-2\sigma R}}{R^2} d\theta dR \quad (6)$$

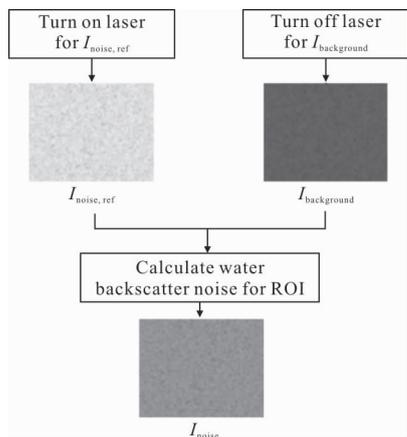


图 5 参考水体去噪算法流程图

Fig.5 Flowchart of water-noise-reference denoising algorithm

式中： $I_l$ 为激光强度； $R_1$ 、 $R_2$ 为距离选通成像范围； $\sigma$ 为水体总衰减系数； $b$ 为体散射函数； $g \in (-1,1)$ ； $f$ 为重叠系数，定义为  $f=A/(\pi r_L^2)$ ，其中  $A$  为激光光斑和相机视场的重叠区域， $r_L$  为激光光斑在成像距离  $R$  处的半径。该后向散射噪声能量分布是由激光脉冲和选通脉冲卷积产生。参考水体噪声图的后向散射噪声与信号选通图中的后向散射噪声满足比例关系，因此，信号选通切片图像的后向散射噪声可以由参考水体噪声图的后向散射噪声图计算获得，如公式(7)所示：

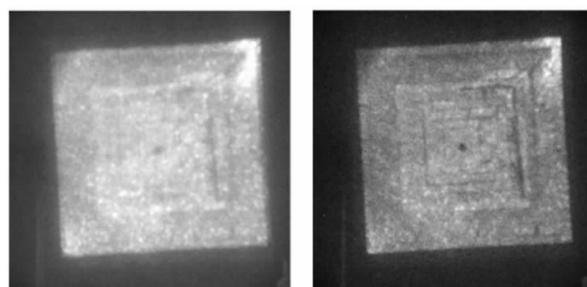
$$I_{\text{noise}} = I_{\text{newref}} \frac{\int_{R_2}^{R_1} \frac{f e^{-2\sigma R}}{R^2} dR}{\int_{R_{02}}^{R_{01}} \frac{f e^{-2\sigma R}}{R^2} dR} \quad (7)$$

式中： $R_0$ 和  $R$  分别为参考水体噪声图、信号选通切片图像的成像范围。

去噪的信号选通切片图像由选通切片图和后向散射噪声图作差分计算获得，如公式(8)所示：

$$I_{\text{new}} = I - I_{\text{noise}} - I_{\text{background}} \quad (8)$$

图 6 所示为参考水体去噪算法的效果图。实验水质约为 0.36 /m，目标位于距离成像系统约 4.5 AL 处。图 6(a)为采集的带有噪声的距离选通切片图，经过参考水体去噪的选通切片图，如图 6(b)所示，图像的信噪比得到了提升。



(a) 原始选通图像 (b) 去噪后选通图像  
(a) Raw gated image (b) Denoising gated image

图 6 参考水体去噪算法实验结果

Fig.6 Experimental result under the water-noise-reference denoising algorithm

## 2 水下距离选通三维成像去噪技术

### 2.1 参考水体三维图像增强算法

距离能量相关法可以通过两幅选通切片图像重建超距离分辨率的三维场景，因此具有低数据量和高实时特性。三角形距离能量相关三维成像由公式(9)获取场景目标的距离信息。

$$r = \frac{\tau c}{2} + \frac{I_B}{I_A + I_B} \frac{t_L c}{2} \quad (9)$$

但是，在选通切片图像中仍然存在水体的后向散射等噪声，严重影响成像质量，尤其是在浑浊的水中，导致水下三维图像存在分辨率低、成像景深变小等问题，如图 7 所示。

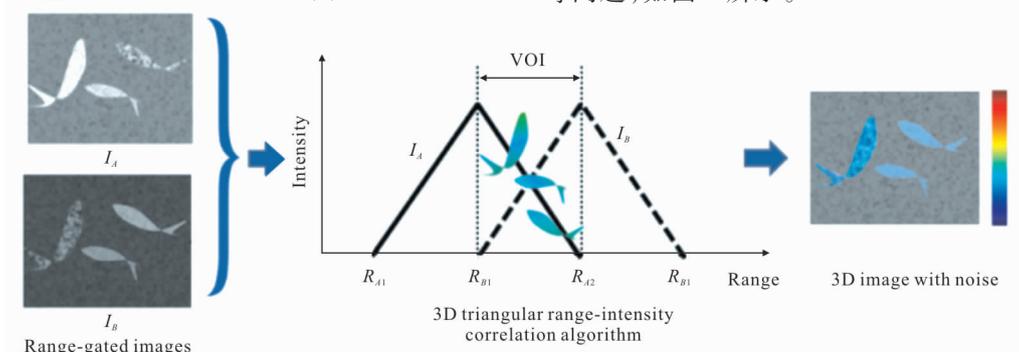


图 7 三角形距离能量相关三维成像

Fig.7 3D triangular range-intensity correlation imaging

为了去除后向散射噪声对三维成像的影响,对散射噪声进行了研究<sup>[19]</sup>,但是,参考文献[19]中,虽然去除后向散射噪声和前向散射噪声后提高了二维图像的对比度,但是,前向散射噪声的去除改变了  $A, B$  帧切片图像的灰度值分布特性,导致三维成像出现较大的误差,而且计算后向散射噪声需要采集大量的水体参考图像,影响成像的实时性。针对上述问题,基于 1.2 节中参考水体去噪算法,提出去水体噪声三维成像,去除距离选通切片图像的后向散射噪声,提高三维成像的距离分辨率。含目标的信号选通切片图像  $I_A$  和  $I_B$  的后向散射噪声由参考水体噪声图的后向散射噪声图计算获得,如公式(10)和公式(11)所示:

$$I_{\text{noise}, A} = I_{\text{newref}} \frac{\int_{R_{A2}}^{R_{A1}} \frac{fe^{-2\sigma R}}{R^2} dR}{\int_{R_{02}}^{R_{01}} \frac{fe^{-2\sigma R}}{R^2} dR} \quad (10)$$

$$I_{\text{noise}, B} = I_{\text{newref}} \frac{\int_{R_{B2}}^{R_{B1}} \frac{fe^{-2\sigma R}}{R^2} dR}{\int_{R_{02}}^{R_{01}} \frac{fe^{-2\sigma R}}{R^2} dR} \quad (11)$$

公式(10)、(11)中,  $R_0, R_A$  和  $R_B$  分别为参考水体噪声图、信号选通切片图像  $I_A$  和信号选通切片图像  $I_B$  的成像范围。去噪后的选通切片图像由公式(12)、(13)计算获得。

$$I_{\text{new } A} = I_A - I_{\text{noise } A} - I_{\text{background}} \quad (12)$$

$$I_{\text{new } B} = I_B - I_{\text{noise } B} - I_{\text{background}} \quad (13)$$

将去噪后的切片图像代入公式(9)中,获得去噪声的三维图像,如图 8 所示。

图 9 所示为参考水体去噪三维成像的实验结果。图 9(a)为使用带有噪声的选通切片图像进行三维反演后得到的三维图像。参考水体去噪三维成像使用去噪后的切片图进行三维反演,以提高三维成

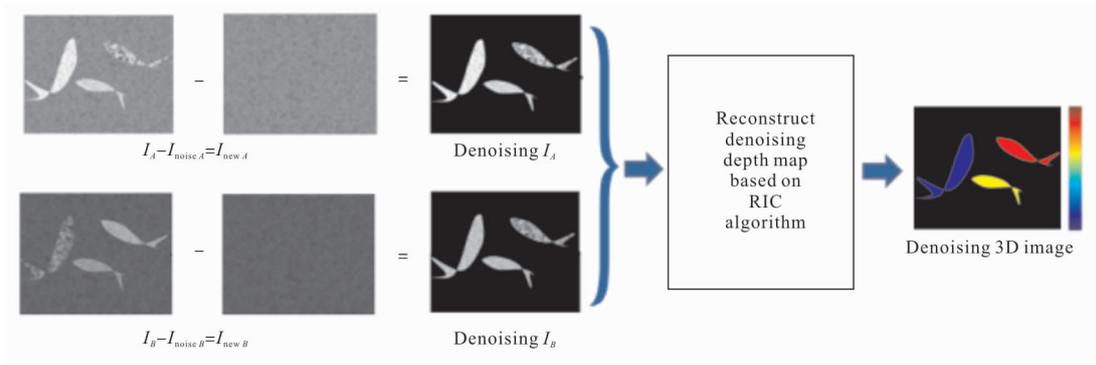


图 8 参考水体去噪三维成像算法

Fig.8 3D water-noise-reference denoising algorithm

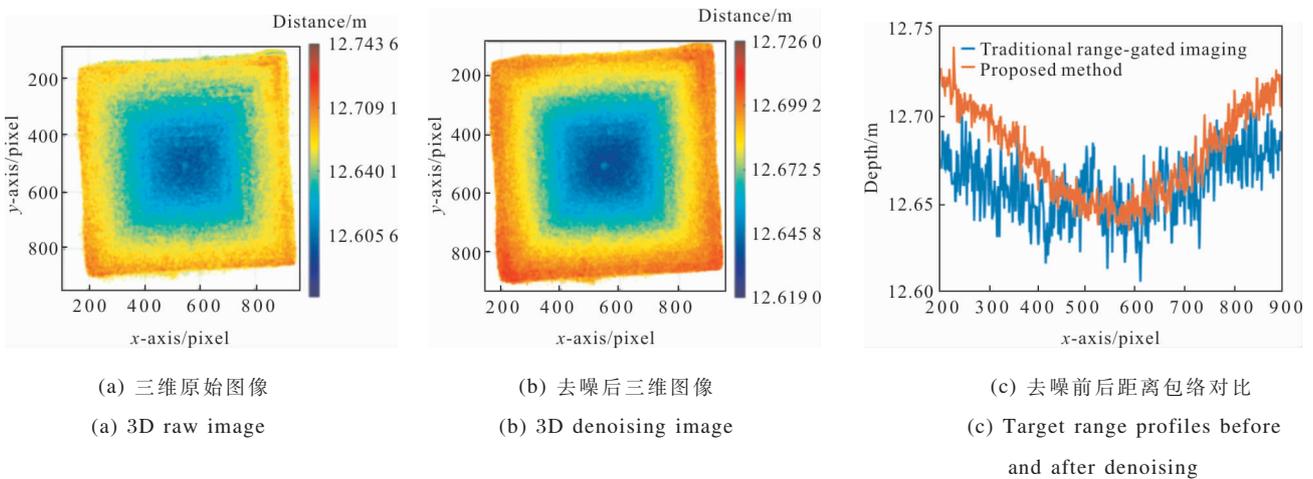


图 9 参考水体去噪三维成像实验结果

Fig.9 Experimental results under the 3D water-noise-reference denoising

像质量,如图 9(b)所示。如图 9(c)所示为图 9(a)、(b)第 512 行的包络线,表明参考水体去噪三维成像进一步提高了距离能量包络三维成像的距离分辨率。

### 2.2 双边滤波三维图像修复算法

水下距离选通成像获取的二维切片图像受水体噪声、目标反射率以及作用距离等的影响。当目标反射率较低或者作用距离较远时,二维图像中目标信

号强度与水体噪声强度相当或低于噪声强度。为了降低三维反演过程中水体噪声的影响,通常采用阈值滤波处理。但是,目标信号强度低于水体噪声的区域会出现深度数据缺失的空洞现象。针对此问题,结合距离能量相关三维成像技术的特点提出一种改进的联合双边滤波算法<sup>[20]</sup>,用以修复深度图像的空洞和噪声。

算法流程如图 10 所示,首先基于原始二维图像

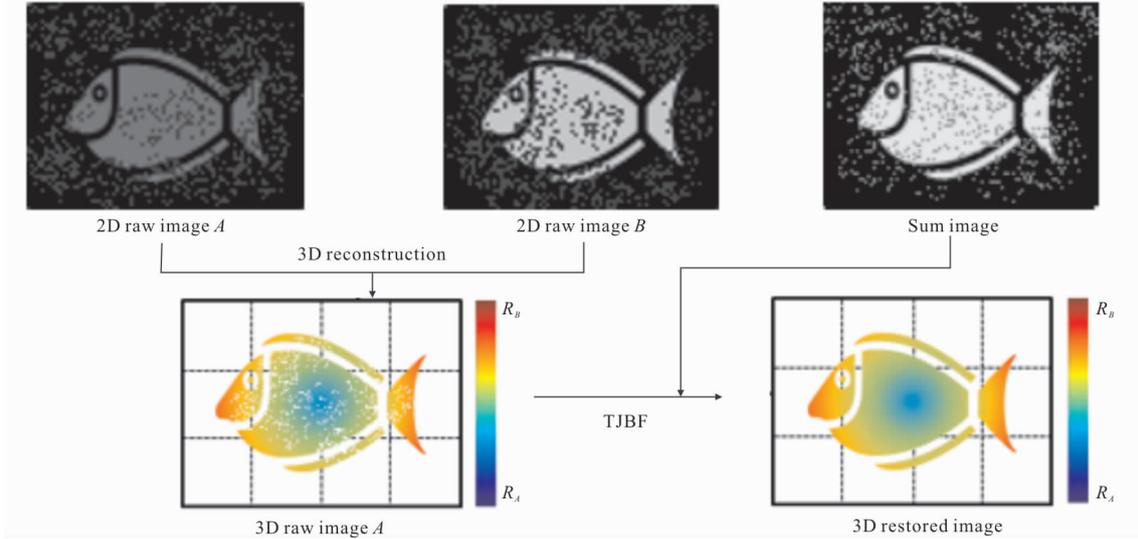


图 10 阈值相关联合双边滤波算法

Fig.10 Threshold-dependent joint bilateral filter algorithm

A 和 B 利用距离能量相关三维成像算法生成原始深度图像,其次将原始图像 A 和 B 相加后获得合成图像 C,最后根据合成图像 C 利用阈值相关联合双边滤波算法修复原始深度图像中的空洞和噪声。

修复的原理基于联合双边滤波算法,修复的过程可用公式表示为:

$$D'(x, y) = \frac{w_{A, B}(x, y)}{w_p} \cdot D(i, j) \quad (14)$$

$$\sum_{ij \in \Omega} w_s(i, j) \cdot w_r(i, j) \cdot w_c(i, j) \cdot D(i, j) \quad (14)$$

$$w_p = \sum_{ij \in \Omega} w_s(i, j) \cdot w_r(i, j) \cdot w_c(i, j) \quad (15)$$

$$w_s(i, j) = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (16)$$

$$w_r(i, j) = \exp\left(-\frac{(I_C(i, j) - I_C(x, y))^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (17)$$

$$w_{A, B}(i, j) = \begin{cases} 0, & I_A(x, y) < T_h \ \& \ I_B(x, y) < T_h \\ 1, & I_A(x, y) \geq T_h \ \parallel \ I_B(x, y) \geq T_h \end{cases} \quad (18)$$

$$w_c(i, j) = \begin{cases} 0, & I_C(i, j) < 1 \\ 1, & I_C(i, j) \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: \$D'(x, y)\$ 为滤波后的输出深度值; \$D(i, j)\$ 为邻域范围内各深度数据值; \$\Omega\$ 为像素点 \$(x, y)\$ 的邻域范围; \$w\_p\$ 为归一化参数; \$w\_s\$、\$w\_r\$ 为图像空间域权值和值域权值; \$\sigma\_s\$、\$\sigma\_r\$ 为高斯函数的标准差; \$I\_A\$、\$I\_B\$、\$I\_C\$ 分别表示原始二维图像 A、B 以及合成图像 C 的灰度值; \$T\_h\$ 表示三维反演的滤波阈值; \$w\_{A, B}\$、\$w\_c\$ 分别表示调控像素点 \$(x, y)\$ 是否需要填充深度数据以及像素点 \$(i, j)\$ 处的权值系数是否需要计算的权值。

权值 \$w\_{A, B}\$ 保证了填充空洞时不会过度的填充,也不会填充不足; 权值 \$w\_c\$ 保证了填充数据的准确性,减少无用的数据的计入导致深度数据的填充不准确。因此相比没有改进的联合双边滤波算法,改进的阈值相关联合双边滤波算法对于距离能量相关三维成像算法获得的深度图像的填充和滤波更为准确、有效。

为了验证算法的有效性，对风眼在水下 3 m 处采集的立体靶标所成的三维图像进行修复，修复效果如图 11 所示。图中显示出未修复的深度图像包含大量的噪声和空洞，修复后深度图像中的空洞得到填充，并且深度图像变得光滑，从而验证了阈值相关联合双边滤波修复算法的有效性。

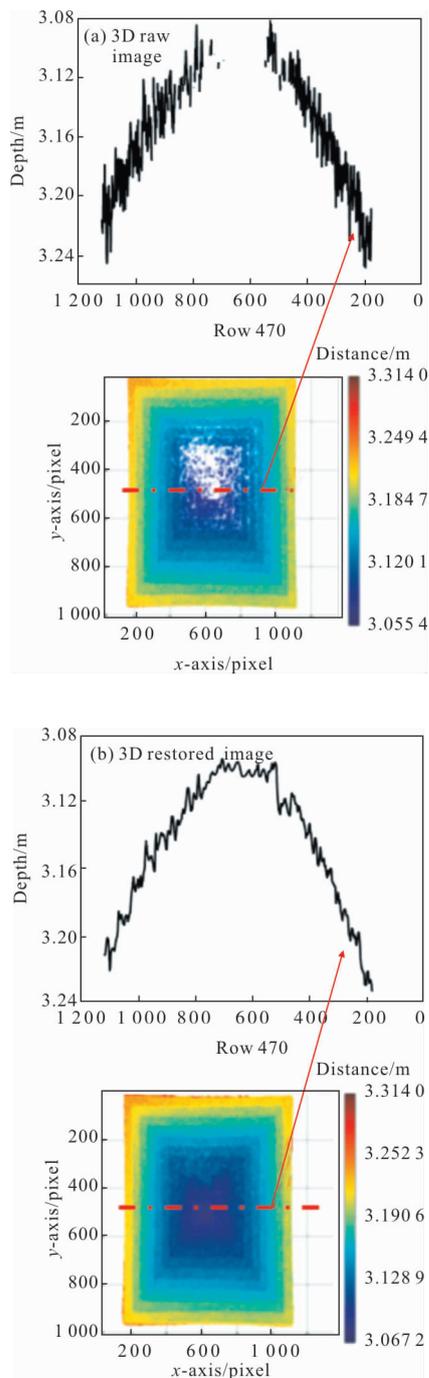


图 11 阈值相关联合双边滤波算法修复结果

Fig.11 Experimental results under the threshold-dependent joint bilateral filter algorithm

### 3 水体去噪总体技术试验结果

在实际水下成像应用中，可将双平台自适应增强算法、参考水体去噪算法、双边滤波三维图像修复算法等融合在一起，具体工作流程如图 12 所示。对于原始选通图像  $A$  和  $B$ ，参考水体噪声图像，利用参考水体去噪算法可实现二维图像去噪增强，获得去噪选通图像  $A$  和  $B$ ，然后，一方面可基于双平台自适应增强算法进一步实现二维图像增强，另一方面可基于去噪选通图像  $A$  和  $B$  利用距离能量相关三维成像算法实现三维重构，进而利用双边滤波三维图像修复算法实现三维图像修复，最终输出增强和修复后的二维强度图像和三维图像。

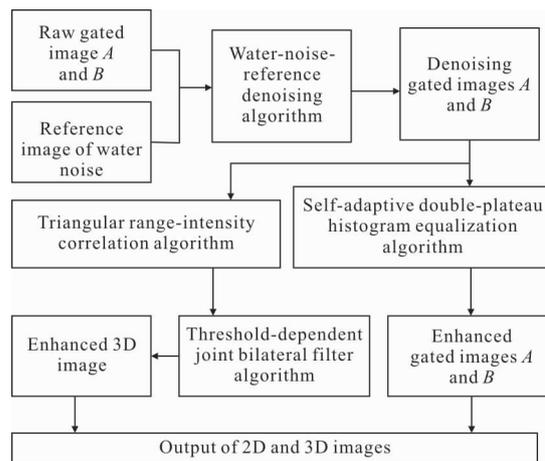
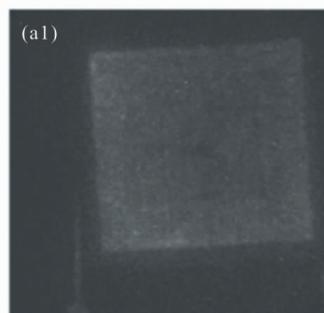
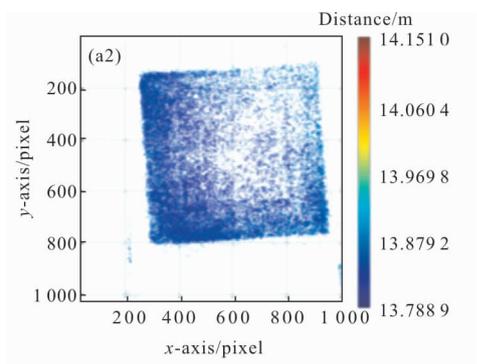


图 12 二维及三维距离选通成像水体去噪工作流程图

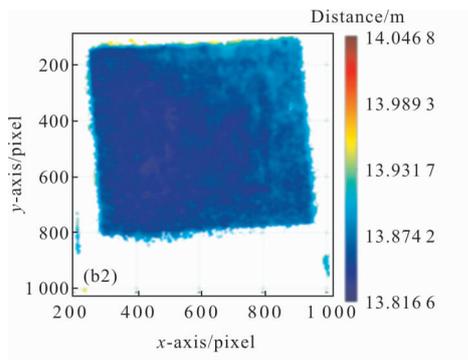
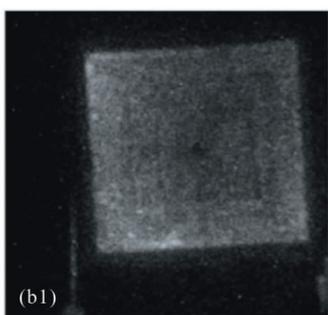
Fig.12 Flowchart of denoising of underwater 2D and 3D range-gated imaging

图 13、14 给出了经过水体去噪总体技术处理后的水池实验结果。实验水池水质为 0.36/m。实验中所用的鱼相比金字塔目标为低反射率目标，鱼的距离约为 3.5 AL，金字塔的距离约为 5 AL。从图 13、14 处理后的二维图像和三维图像可以发现，经过图 12 所





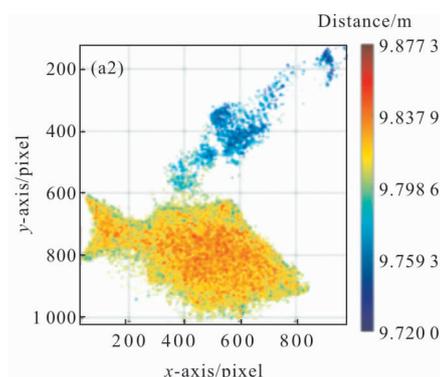
(a) 原始二维图像和三维图像  
(a) 2D and 3D raw images



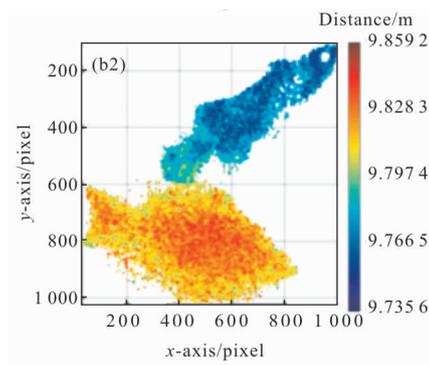
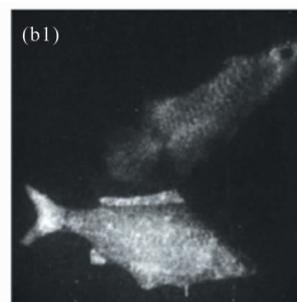
(b) 处理后二维图像和三维图像  
(b) 2D and 3D denoising images

图 13 金字塔目标靶水池试验结果

Fig.13 Pool experimental result of pyramid target



(a) 原始二维图像和三维图像  
(a) 2D and 3D raw images

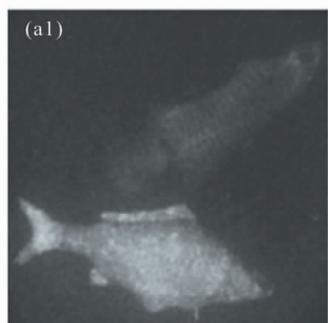


(b) 处理后二维图像和三维图像  
(b) 2D and 3D denoising images

图 14 鱼水池实验结果

Fig.14 Pool experimental result of fish

示的水体去噪总体技术后,二维图像得到有效增强,同时三维图像中的空洞也得到明显修复。



#### 4 结束语

与传统水下摄像机相比,水下距离选通成像可实现更远距离的探测,并可获得三维成像,因此,可与声呐形成有效互补。但是,在水下距离选通成像中,切片水体散射干扰、目标反射率差异、极限距离探测等引起的二维图像信噪比和对比度变差,三维图像距离分辨率降低,甚至数据出现空洞等问题。针对此,论文提出了水下二维及三维距离选通成像去噪技术,相关实验结果验证了所提技术的可行性。虽

然本论文的三维成像去噪方法主要是针对三角形距离能量相关三维成像提出的,但是其二维成像去噪方法也可用于时间切片扫描三维成像和梯形距离相关三维成像。在实际水下成像应用中,研究人员应根据实际情况选择和优化论文所给出的四种方法,可独立或联合用于水下距离选通成像的去噪增强,获得更高质量的水下光学图像。

#### 参考文献:

- [1] Jules S Jaffe, Kad D Moore, John McLean, et al. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2011, 14(3): 64–75.
- [2] Lester F Gillespie. Apparent illuminance as a function of range in gated laser night-viewing systems[J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(7): 883.
- [3] Fournier G R, Bonnier D, Forand L, et al. LUCIE ROV mounted laser imaging system [C]//Proc SPIE, 1992, 1750: 443–452.
- [4] Alan Weidemann, Georges R Fournier, Forand L. In harbor underwater threat detection/identification using active imaging[C]//Proc SPIE, 2005, 5780: 59–70.
- [5] Philip Church, Weilin Hou, Georges Fournier, et al. Overview of a hybrid underwater camera system [C]//Proc SPIE, 2014, 9111: 91110O.
- [6] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4705–4710.
- [7] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Optics Letters*, 2007, 32 (21): 3146–3148.
- [8] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7399–7046.
- [9] Wang Xinwei, Sun Liang, Lei Pingshun, et al. Underwater 3D triangular range-intensity correlation imaging beyond visibility range (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903001. (in Chinese)
- [10] Christnacher F, Laurenzis M, Monnin D, et al. 3D laser gated viewing from a moving submarine platform [C]//SPIE, 2014, 9250: 92500F.
- [11] Petter Risholm, Jostein Thorstensen, Jens T Thielemann, et al. Real-time super-resolved 3D in turbid water using a fast range-gated CMOS camera [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3927–3937.
- [12] Raju A, Dwarakish G S, D Venkat Reddy. A comparative analysis of histogram equalization based techniques for contrast enhancement and brightness preserving [J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2013, 6(5): 353–366.
- [13] Kuldeep Singh, Rajiv Kapoor. Image enhancement using exposure based sub image histogram equalization [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2014, 36(15): 10–14.
- [14] Sun Liang, Wang Xinwei, Liu Xiaoquan, et al. Lower-upper-threshold correlation for underwater range-gated imaging self-adaptive enhancement [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(29): 8248–8255.
- [15] Tan ChingSeong, Gerald Seet, Andrzej Sluzek, et al. Scattering noise estimation of range-gated imaging system in turbid condition [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (20): 21147–21154.
- [16] Negahdaripour S, Sarafraz A. Improved stereo matching in scattering media by incorporating a backscatter cue [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23 (12): 5743–5755.
- [17] Tsiotsios C, Angelopoulou M E, Kim T K, et al. Backscatter compensated photometric stereo with 3 sources[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014.
- [18] Mcglamery B L. A computer model for underwater camera systems[C]//Proc SPIE, 1979, 208: 221–231.
- [19] Wang Minmin, Wang Xinwei, Yang Yuqing, et al. Underwater de-scattering range-gated imaging based on numerical fitting and frequency domain filtering [C]//ICIRA, 2019: 195–204.
- [20] Yang Yuqing, Wang Xinwei, Sun Liang, et al. Threshold-dependent joint bilateral filter algorithm for enhancing 3D gated range-intensity correlation imaging [C]//ICIRA, 2019: 205–214.