

基于偏振特征的水面饱和耀光抑制技术

张景华, 张焱*, 石志广, 李彪, 张宇, 凌峰, 张毅, 刘荻

国防科技大学电子科学学院 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 为解决水面及水下目标侦察、探测、识别过程中存在的水面耀光干扰问题,利用偏振特征实现了水面耀光的抑制和目标的增强。分析了水面光波反射和折射过程中偏振特征传输规律,利用光波在垂直方向和平行方向上的光强分布关系,提出一种基于偏振反折射效应的水面耀光抑制方法。该方法利用水面反射偏振度、折射偏振度、垂直方向光强图像和平行方向光强图像,实现了水面耀光的分离和抑制。针对饱和耀光抑制过程中存在的垂直方向光强图像饱和和失真问题,提出了一种基于完全偏振分解的饱和光强恢复方法,利用平行方向光强图像和任意一个非饱和起偏方向上获取的光强图像计算恢复出垂直方向光强图像,然后利用恢复后的垂直方向光强图像实现水面饱和耀光的抑制。实验结果表明,通过对水面耀光的抑制,有效提升了耀光区域内目标和背景之间的对比度及信噪比,增强了目标的显著性。

关键词 海洋光学; 偏振特征; 完全偏振分解; 水面耀光抑制; 饱和图像恢复; 目标增强

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401009

Suppression Technology for Saturated Water Surface Glint Based on Polarization Characteristics

Zhang Jinghua, Zhang Yan*, Shi Zhiguang, Li Biao, Zhang Yu, Ling Feng, Zhang Yi, Liu Di

National Key Laboratory of Science and Technology on Automatic Target Recognition, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract To solve water surface glint interference problem in the reconnaissance, detection, and recognition of water surface and underwater targets, this paper uses polarization characteristics to suppress water surface glint and enhance targets. For this purpose, the propagation laws of the polarization characteristics of light waves during the reflection and refraction of such waves at the water surface are analyzed. According to the relationship between the intensity distributions of light waves in perpendicular and parallel directions, this paper proposes a suppression method for water surface glint based on the reflection and refraction polarization effects. This method achieves the separation and suppression of water surface glint by using the degree of reflection polarization, the degree of refraction polarization, the perpendicular light intensity image, and the parallel light intensity image. A saturated light intensity restoration method based on complete polarization decomposition is proposed to address the problem of saturation distortion of the perpendicular light intensity image in the suppression of saturated glint. The perpendicular light intensity image can be calculated and restored with the parallel light intensity image and the light intensity image obtained in any unsaturated polarizing direction. Then, the restored perpendicular light intensity image can be used to suppress the saturated water surface glint. The experimental results show that the suppression of the water surface glint effectively increases both the contrast and the signal-to-noise ratio between the target and the background in the glint area and thereby enhances the prominence of the target.

Key words ocean optics; polarization characteristics; complete polarization decomposition; suppression of water surface glint; saturated image restoration; target enhancement

1 引言

水面耀光是指水面直接反射太阳辐射、云层辐射、

大气辐射等形成的强光信号^[1-3]。由于水体具有光滑表面,反射效应较强,当太阳光、大气散射光、云层散射光入射到水体表面时,在入射方向与水面法线对称的

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-07-13; 录用日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(62075239,61302145)、武器装备预研项目(9140C800302KG01)

通信作者: *atrthreefire@sina.com

反射方向上会形成强烈的反射能量^[4-5]。水面耀光是常见的自然现象,但是对于光电探测而言,它是一种十分强烈的干扰源。在耀光区域,水体表面反射光强度比水体向上的出射光强度高出数倍^[6-7],在利用光电探测器对船舶等水面目标以及蛙人、水雷等水下目标进行检测和识别时,水面反射的耀光会淹没目标信号,导致光学图像中目标的漏检和误检^[8],尤其是在直接反射太阳光的强耀光区域,水面反射光强度可达到出射光强度的几十倍,此时光电传感器达到饱和,在成像平面上会形成高亮区域,无法对耀光区域获取的图像进行进一步的信息处理^[9]。实现水面耀光的抑制,对海洋资源开发、海水环境监测、海洋搜救、军事侦察打击等方面具有重要的应用价值^[10]。

根据水面反射耀光强度的不同,可以将耀光分为非饱和耀光与饱和耀光两类。非饱和耀光是指探测器接收到的光强值并未达到饱和状态的耀光,此种情况下,探测器获取的耀光强度值在其成像能力范围内,该值会在光学图像中正常显示出来,不会出现图像饱和的现象,因此可以直接利用偏振探测器获取的光强图像求解偏振信息。饱和耀光是指探测器接收到的光强值达到饱和状态的耀光。偏振探测器获取的图像出现饱和现象,不仅会导致图像纹理和细节的丢失,还会引起偏振信息的失真,造成偏振信息的解算出现较大偏差,影响耀光的分离和抑制效果。根据反射光的偏振

特性,在垂直入射面起偏方向上,水面反射光的强度值最大^[11-13],因此,在垂直方向上获取的水面耀光图像最容易达到饱和状态。

本文提出一种基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法,该算法利用水面反射偏振度、折射偏振度、垂直方向光强图像和平行方向光强图像,实现了水面耀光的分离和抑制。针对饱和耀光分离过程中存在的垂直方向光强图像饱和和失真问题,提出一种基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法,该算法通过将垂直方向光强分解为平行方向光强和完全偏振光强之和,有效恢复出垂直方向光强图像中因耀光饱和而缺失的图像信息。光波的偏振特性决定了探测器在不同起偏方向上获取的光强值是不同的,因此对于饱和耀光而言,尽管在垂直方向上获取的光强图像处于饱和和状态,但并不是所有起偏方向上获取的光强值都达到了饱和,尤其是在平行方向上,反射能量最低,通过偏振探测器在该方向附近获取的光强图像并未达到饱和和状态,依然属于有效值。当偏振探测器获取的垂直方向光强图像达到饱和和状态时,通过本文提出的基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法,能够利用平行方向光强图像和任意一个非饱和和起偏方向获取的光强图像计算恢复出垂直方向光强图像,利用恢复后的垂直方向光强图像实现水面饱和耀光的抑制。图 1 为本文水面饱和耀光抑制算法流程图。

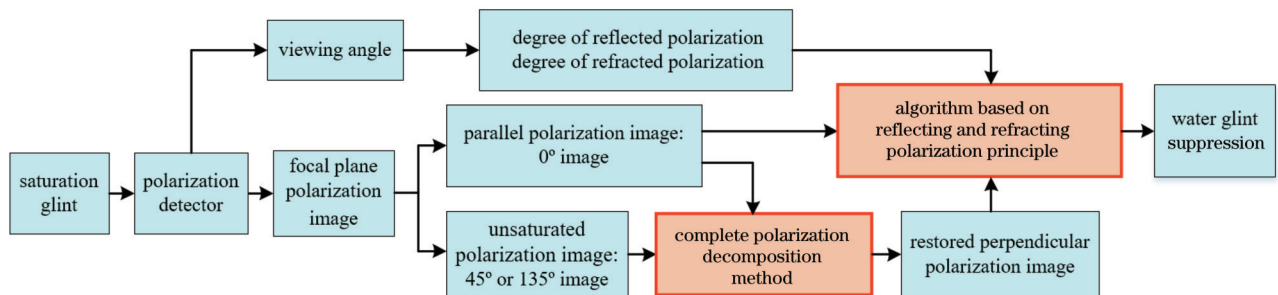


图 1 水面饱和耀光抑制算法流程图

Fig. 1 Flow chart of water surface saturation glint suppression algorithm

2 水面耀光区域偏振特性分析

水面耀光是一种十分常见的自然现象,是由水体表面直接反射太阳光、大气和云层散射光形成,在利用光电探测器对水面场景进行监测和侦察的过程中,常常会遇到水面耀光的干扰^[14]。因此,水面耀光抑制对提升光电探测设备的成像质量、增强海面背景下目标检测和识别能力有着重要的现实需求和应用价值^[15]。如图 2 所示,水面耀光的反射源主要有太阳直射光、大气散射光、云层散射光等^[16],其中,太阳直射产生的耀光对图像的影响最大、干扰最强,尤其是当有风存在时,水面会形成起伏不断的波浪,从而形成大面积的太阳耀光区域^[17],导致水面目标和水下目标淹没在耀光杂波中。

由于水面反射的光波具有明显的偏振特征,通过

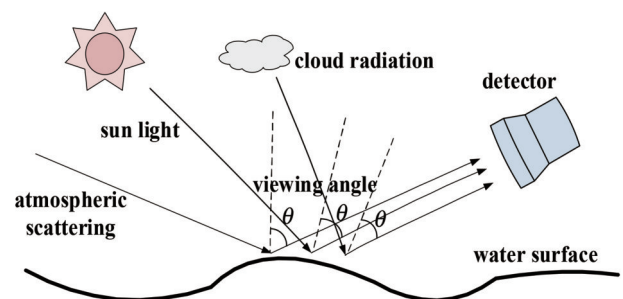


图 2 水面反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflection on water surface

对水面反射光的偏振特性进行分析和研究,能够为水面耀光的分离和抑制提供理论基础和技术支撑。探测器接收到的水面光强主要包括以下两部分:一部分是水面直接反射的光波,称之为水面反射光,水面反射光

是形成耀光的主要来源;另一部分是水体内部微粒经过散射或者反射之后,再经过水面折射向上出射的光波,称之为水面折射光。气-水界面光波传输过程如图 3 所示,光波在水面发生反射和折射后,偏振状态会发生改变。由于水面反射系数和折射系数在垂直方向上和平行方向上均存在较大差异,因此水面反射光和折射光的偏振状态是不同的。这里垂直方向和平行方向是相对于入射面(入射面是指入射光线、法线构成的平面)的方向而言。当偏振探测器像平面的横轴与地表水平线方向平行时,偏振探测器 0°起偏角对应的方向是垂直方向,即垂直于水面入射面的方向,90°起偏角对应的方向是平行方向,即平行于入射面的方向。

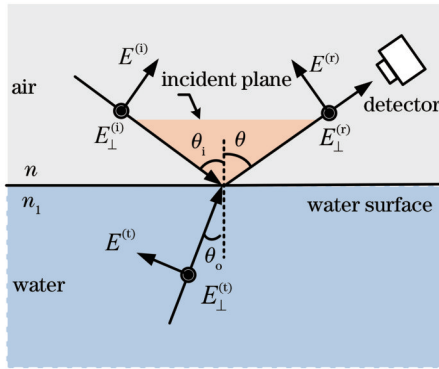


图 3 气-水界面光波传输过程

Fig. 3 Light wave transmission process at air-water interface

水面耀光抑制的最终目的是分离水面反射光,获得水面折射光。根据菲涅耳反射定律,水面反射光和折射光电场分量在平行方向上和垂直方向上的反射系数和折射系数^[18-19]分别为

$$\begin{cases} r_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}^{(r)}}{E_{\parallel}^{(i)}} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_o)}{\tan(\theta_i + \theta_o)} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n \cos \theta_o}{n_1 \cos \theta_i + n \cos \theta_o} \\ r_{\perp} = \frac{E_{\perp}^{(r)}}{E_{\perp}^{(i)}} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_o)}{\sin(\theta_i + \theta_o)} = \frac{n \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_o}{n \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_o} \end{cases}, (1)$$

$$\begin{cases} t_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}^{(t)}}{E_{\parallel}^{(i)}} = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_o}{\sin(\theta_i + \theta_o) \cos(\theta_i - \theta_o)} = \frac{2n \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n \cos \theta_o} \\ t_{\perp} = \frac{E_{\perp}^{(t)}}{E_{\perp}^{(i)}} = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_o}{\sin(\theta_i + \theta_o)} = \frac{2n \cos \theta_i}{n \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_o} \end{cases}, (2)$$

式中: $E_{\parallel}^{(i)}$ 和 $E_{\perp}^{(i)}$ 分别为入射光电矢量在平行方向上和垂直方向上的分量; $E_{\parallel}^{(r)}$ 和 $E_{\perp}^{(r)}$ 分别为反射光电矢量在平行方向上和垂直方向上的分量; $E_{\parallel}^{(t)}$ 和 $E_{\perp}^{(t)}$ 分别为折射光电矢量在平行方向上和垂直方向上的分量; r_{\parallel} 和 r_{\perp} 分别为电矢量在平行方向上和垂直方向上的反射系数; t_{\parallel} 和 t_{\perp} 分别为电矢量在平行方向上和垂直方向上的折射系数; θ_i 和 θ_o 分别为入射角和折射角; n 和 n_1 分别为空气和水体的折射率, n, n_1 满足如下关系:

$$\frac{n_1}{n} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_o}. \quad (3)$$

通常空气折射率可设置为 1,则有

$$n_1 = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_o}. \quad (4)$$

根据正交方向上电矢量反射系数,可求得水面反射光在平行方向上反射率 R_{\parallel} 、垂直方向上反射率 R_{\perp} 以及反射偏振度 γ 如下^[20]:

$$\begin{cases} R_{\parallel} = \frac{|E_{\parallel}^{(r)}|^2}{|E_{\parallel}^{(i)}|^2} = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n \cos \theta_o}{n_1 \cos \theta_i + n \cos \theta_o} \right|^2 \\ R_{\perp} = \frac{|E_{\perp}^{(r)}|^2}{|E_{\perp}^{(i)}|^2} = \left| \frac{n \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_o}{n \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_o} \right|^2 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\gamma = \left| \frac{R_{\perp}(\theta) - R_{\parallel}(\theta)}{R_{\perp}(\theta) + R_{\parallel}(\theta)} \right| = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta}}{n_1^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}, \quad (6)$$

式中: θ 为观测角,根据反射定律,观测角 θ 等于入射角 θ_i 。

同理可求得水面折射光在平行方向上发射率 ϵ_{\parallel} 、垂直方向上发射率 ϵ_{\perp} 以及折射偏振度 χ ^[20]如下:

$$\begin{cases} \epsilon_{\parallel} = \frac{|E_{\parallel}^{(t)}|^2}{|E_{\parallel}^{(i)}|^2} = \left| \frac{2n \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n \cos \theta_o} \right|^2 \\ \epsilon_{\perp} = \frac{|E_{\perp}^{(t)}|^2}{|E_{\perp}^{(i)}|^2} = \left| \frac{2n \cos \theta_i}{n \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_o} \right|^2 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\chi = \left| \frac{\epsilon_{\perp}(\theta) - \epsilon_{\parallel}(\theta)}{\epsilon_{\perp}(\theta) + \epsilon_{\parallel}(\theta)} \right| = \frac{(n_1 - 1/n_1)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2n_1^2 - (n_1 + 1/n_1)^2 \sin^2 \theta + 4 \cos \theta \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (8)$$

通过式(6)和式(8)可以看出,水面同时存在光波的反射和折射现象,且反射和折射效应都会导致光波的偏振状态发生改变,水面反射光和折射光的偏振度大小和水质折射率、探测器观测角有关,当水质折射率、探测器观测角确定后,可以直接通过式(8)计算得到水面反射偏振度 γ 和折射偏振度 χ 。

3 基于完全偏振分解的饱和耀光抑制

3.1 水面耀光分离原理

水面耀光是由于水面发生的强烈镜面反射效应形成的,水面耀光抑制的本质是光滑物体表面镜面反射光的分离。文献[5]中提出了一种基于偏振特征的光滑物体表面镜面反射光分离算法,该算法依据偏振正交分解原理,利用反射光和透射光在垂直方向和平行方向上的光强分布关系,通过反射偏振度和折射偏振度求解得到透明物体表面反射光强度值和透射光强度值。本节根据反射偏振度、折射偏振度与反射光强度值、折射光强度值之间的关系,提出一种基于偏振反折效应的水面耀光抑制方法,该方法首先通过偏振探测器的观测角计算得到水面反射偏振度和折射偏振

度,然后利用反射偏振度和折射偏振度求解水面反射光强度值和折射光强度值,最后通过分离水面反射光、保留水面折射光实现水面耀光的抑制。

根据偏振正交分解原理,探测器接收到的水面垂直方向光强分量 I^\perp 和平行方向光强分量 I^\parallel 分别为

$$\begin{cases} I^\perp(i,j) = I_R^\perp(i,j) + I_T^\perp(i,j) \\ I^\parallel(i,j) = I_R^\parallel(i,j) + I_T^\parallel(i,j) \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_R^\perp 和 I_R^\parallel 分别为水面反射光垂直方向的光强分量和平行方向的光强分量; I_T^\perp 和 I_T^\parallel 分别为水面折射光垂直方向的光强分量和平行方向的光强分量; (i,j) 为像

素点的坐标。

由于反射光和折射光都属于偏振光,根据偏振度的定义,可通过正交方向上光强分量求解反射偏振度 γ 、折射偏振度 χ :

$$\gamma(i,j) = \frac{I_R^\perp(i,j) - I_R^\parallel(i,j)}{I_R^\perp(i,j) + I_R^\parallel(i,j)} \quad (10)$$

$$\chi(i,j) = \frac{I_T^\parallel(i,j) - I_T^\perp(i,j)}{I_T^\parallel(i,j) + I_T^\perp(i,j)} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9),可得到水面折射光在垂直方向上和平行方向上的光强分量:

$$\begin{cases} I_T^\perp(i,j) = \frac{[1 - \chi(i,j)]\{[1 + \gamma(i,j)]I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)]I^\perp(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \\ I_T^\parallel(i,j) = \frac{[1 + \chi(i,j)]\{[1 + \gamma(i,j)]I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)]I^\perp(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \end{cases} \quad (12)$$

同时,确定水面反射光在垂直方向上和平行方向上的光强分量分别为

$$\begin{cases} I_R^\perp(i,j) = \frac{[1 + \gamma(i,j)]\{[1 + \chi(i,j)]I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)]I^\parallel(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \\ I_R^\parallel(i,j) = \frac{[1 - \gamma(i,j)]\{[1 + \chi(i,j)]I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)]I^\parallel(i,j)\}}{2[\gamma(i,j) + \chi(i,j)]} \end{cases} \quad (13)$$

总光强等于垂直方向和平行方向光强之和,根据反射偏振度 γ 和折射偏振度 χ 求解得到水面反射光强度值和折射光强度值^[5]如下:

$$\begin{cases} I_T(i,j) = \frac{[1 + \gamma(i,j)]I^\parallel(i,j) - [1 - \gamma(i,j)]I^\perp(i,j)}{\chi(i,j) + \gamma(i,j)} \\ I_R(i,j) = \frac{[1 + \chi(i,j)]I^\perp(i,j) - [1 - \chi(i,j)]I^\parallel(i,j)}{\chi(i,j) + \gamma(i,j)} \end{cases} \quad (14)$$

通过式(14),可以利用反射偏振度和折射偏振度将偏振探测器获取的垂直方向光强图像和平行方向光强图像分离为反射光图像和折射光图像,其中分离得到的反射光图像就是水面镜面反射的耀光成分,分离得到的折射光图像就是耀光抑制后的图像。本文提出的基于偏振反折射效应的水面耀光抑制方法能够充分利用光波折射和反射过程中的偏振特征和物理规律,相对于图像融合、图像修复、图像滤波等基于图像特征的水面耀光抑制算法具有更好的适用性和更为有效的抑制效果,且该方法在抑制耀光的同时,避免了传统偏振片法抑制耀光过程中存在的目标能量损失、离水辐射损失等问题,能够显著提升耀光区域中目标和背景之间的对比度,更有利于目标的检测和识别。

3.2 基于完全偏振分解的垂直方向饱和光强图像恢复

饱和耀光分离过程中面临的主要难点是偏振探测器获取的垂直方向光强图像存在严重失真的问题。由于水面反射的耀光能量主要分布在垂直方向上,因此,偏振探测器获取的起偏角在垂直方向附近的光强图像会达到饱和值。通过式(14)可以看出,水面折射光强由反射偏振度、折射偏振度、垂直方向光强和平行方向光强共同决定。由于水体的折射率是确定的,探测器相对于水面的观测角也能够通过角度测量仪测量得到,当观测角和折射率已知时,可以直接求得反射偏振度和折射偏振度。因此,如何计算水面垂直方向光强成为抑制水面饱和和耀光的关键。

针对偏振探测器获取的垂直方向光强图像存在饱和和失真的问题,本文提出一种基于完全偏振分解的垂直方向光强图像恢复方法,通过将垂直方向光强分解为平行方向光强和完全偏振光强,然后利用分焦平面探测器获取的非饱和偏振图像,有效恢复出垂直方向光强图像中因耀光饱和而缺失的图像信息。

根据完全偏振分解原理,偏振光可以分解为自然光和完全偏振光^[21]:

$$I^{(a)} = I_N^{(a)} + I_P^{(a)} = \frac{1}{2} I_N + I_P \cos^2(\alpha - A), \quad (15)$$

式中: α 为起偏角; $I^{(\alpha)}$ 为起偏角为 α 时对应的偏振光光强值; $I_N^{(\alpha)}$ 为起偏角为 α 时对应的自然光光强值; $I_P^{(\alpha)}$ 为起偏角为 α 时对应的完全偏振光光强值; I_N 为偏振光中自然光光强值; I_P 为偏振光中完全偏振光光强值; A 为偏振角。

起偏角为平行方向时对应的角度值 $\alpha_{//} = A \pm \pi/2$, 水面耀光强度值最小, 此时平行方向的光强值为

$$I^{(\alpha_{//})} = \frac{1}{2} I_N \quad (16)$$

起偏角为垂直方向时对应的角度值 $\alpha_{\perp} = A \pm k\pi$, $k = 0, 1$, 水面耀光强度值最大, 此时垂直方向的光强值为

$$I^{(\alpha_{\perp})} = \frac{1}{2} I_N + I_P = I^{(\alpha_{//})} + I_P \quad (17)$$

通过式(17)可以看出, 垂直方向光强值 $I^{(\alpha_{\perp})}$ 等于平行方向光强值 $I^{(\alpha_{//})}$ 与完全偏振光强值 I_P 之和, 这就是偏振探测器获取的垂直方向光强图像容易达到饱和的原因。尽管垂直方向光强 $I^{(\alpha_{\perp})}$ 在达到饱和之后, 无法通过偏振探测器直接获取有效的垂直方向光强信息。但是由于平行方向光强 $I^{(\alpha_{//})}$ 属于非饱和状态, 如果计算得到完全偏振光强值 I_P , 就可以通过式(17)求出垂直方向光强值 $I^{(\alpha_{\perp})}$, 从而避免偏振探测器直接获取垂直方向光强图像时出现的饱和问题。

对于水面耀光, 并不是所有起偏方向上光强值都达到饱和值, 若存在起偏角 α_1 , 此角度下获取的偏振图像未达到饱和状态。通过偏振探测器获取起偏角 α_1 处的光强图像 $I^{(\alpha_1)}$, 然后利用 $I^{(\alpha_1)}$ 求解完全偏振光强值 I_P :

$$I^{(\alpha_1)} = \frac{1}{2} I_N + I_P \cos^2(\alpha_1 - A), \quad (18)$$

则

$$I^{(\alpha_1)} = I^{(\alpha_{//})} + I_P \cos^2(\alpha_1 - A). \quad (19)$$

由于 α_1 和 $I^{(\alpha_1)}$ 都是已知量, 因此可求得 I_P 为

$$I_P = \frac{I^{(\alpha_1)} - I^{(\alpha_{//})}}{\cos^2(\alpha_1 - A)}. \quad (20)$$

通过式(20)可以求得垂直方向光强值 $I^{(\alpha_{\perp})}$ 为

$$I^{(\alpha_{\perp})} = I^{(\alpha_{//})} + \frac{I^{(\alpha_1)} - I^{(\alpha_{//})}}{\cos^2(\alpha_1 - A)}. \quad (21)$$

当利用偏振探测器对水面耀光进行观测时, 由于水面方向是确定的, 所以偏振角方向也是固定的。为了方便计算, 令与水平面垂直的方向为偏振角参考方向, 此时对应的水面耀光偏振角 A 为 0° , 从而可将式(21)简化为

$$I^{(\alpha_{\perp})} = I^{(\alpha_{//})} + \frac{I^{(\alpha_1)} - I^{(\alpha_{//})}}{\cos^2 \alpha_1}. \quad (22)$$

因此, 当使用偏振探测器直接获取的垂直方向光强图像达到饱和时, 可以利用平行方向光强图像和任意一个非饱和起偏方向获取的光强图像求得垂直方向光强图像。理论上, α_1 可取除平行方向之外的任意一个非饱和光强下的起偏角, 考虑到使用的偏振探测器是 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四通道分焦平面偏振探测器, 为了方便获取水面垂直方向光强图像和平行方向光强图像, 即耀光最强和最弱时的光强图像, 通常在放置偏振探测器时会像平面的横坐标轴和地表水平线方向平行, 此时 0° 起偏角下获取的光强图像就是垂直方向光强图像, 90° 起偏角下获取的光强图像就是平行方向光强图像, α_1 可取 45° 或者 135° 。因此当探测器获取的垂直方向光强图像 (0° 图像) 处于饱和状态时, 可以通过 90° 和 45° 或者 90° 和 135° 起偏角下获取的光强图像求出垂直方向光强图像, 从而对饱和的垂直方向光强图像进行恢复。获得恢复后的垂直方向光强图像之后, 通过基于偏振反射效应的水面耀光抑制算法, 利用反射偏振度和折射偏振度能够实现水面饱和耀光的分离和抑制。

4 饱和耀光抑制实验及结果分析

4.1 水面饱和耀光抑制室内模拟

模拟实验的优点是环境变量易于控制, 方便设置特定实验条件, 能够精准针对某一要素进行深入分析研究。在开展耀光反射模拟实验时, 用到的实验器材主要有偏振探测器、日光灯、水箱等, 如图 4 所示。其中, 日光灯的主要作用是模拟光源照射过程, 水箱的主要作用是对日光灯进行反射并形成耀光区域, 偏振探测器的主要作用是获取偏振图像, 该偏振探测器为分焦平面偏振探测器^[22], 可以同时得到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四通道光强图像。

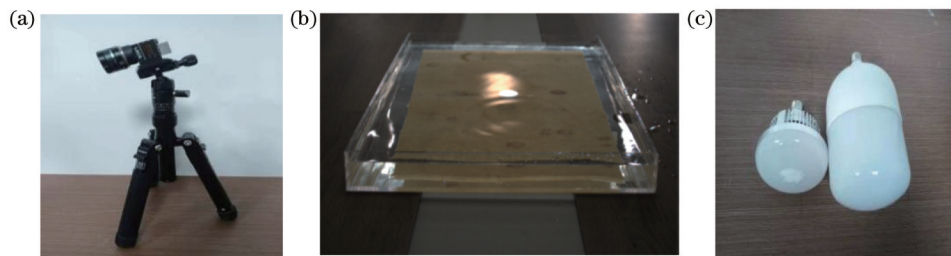


图 4 模拟实验主要器材。(a)偏振探测器;(b)水箱;(c)日光灯

Fig. 4 Main equipment of simulation experiment. (a) Polarization detector; (b) water tank; (c) fluorescent lamp

图 5 为在室内模拟实验中利用偏振探测器获取的饱和耀光四通道光强图像,可以看出,在垂直方向光强图像中,即起偏角为 0° 的光强图像中,水面反射形成的耀光区域处于饱和状态,强烈的耀光掩盖了目标的纹理和细节信息。在 45° 、 90° 、 135° 起偏角下获取的光强图像中,尽管水面存在耀光区域,但是耀光区域像素点的强度值并未达到饱和,目标信息并没有被完全淹没,可以辨别出耀光区域中目标的轮廓信息(该图中耀光区域内目标是放置在水箱里的一个 Y 形塑料片)。

偏振探测器直接获取的垂直方向光强图像(0° 图

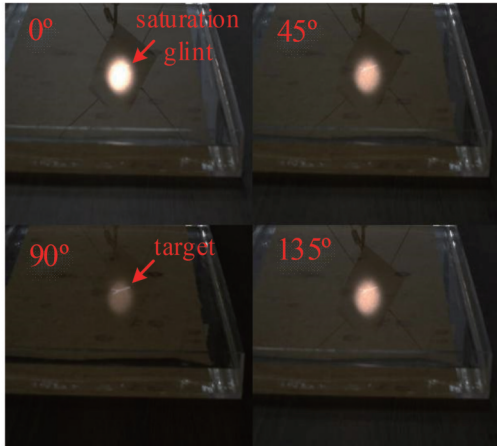


图 5 偏振探测器获取的四通道分焦平面偏振图像

Fig. 5 Four channel focal plane polarization image captured by polarization detector

像)出现了图像饱和和失真的现象,影响耀光的分离和抑制。为了提升饱和耀光的抑制效果,通过本文提出的基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法,利用平行方向光强图像(90° 图像)和一个非饱和起偏方向的光强图像(135° 图像)计算得到新的垂直方向光强图像。图 6(a)为偏振探测器直接获取的垂直方向光强图像(0° 图像),图 6(b)为通过基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法计算得到的垂直方向光强图像。为了方便对两者进行比较,将垂直方向光强图像由 RGB 格式转化为了 YCbCr 格式,并将 YCbCr 格式中的亮度(luma)成分以伪彩色的形式显示。通过对比图 6(a)和图 6(b)可以看出,探测器直接获取的垂直方向光强图像出现了像素点饱和现象,饱和后的像素点最大亮度值为 255,而利用式(22)计算得到的垂直方向光强图像有效恢复了因像素点饱和而缺失的亮度信息。图 6(c)为直接利用偏振探测器获取的四通道图像计算得到的偏振度图像,可以看出,受垂直方向光强图像中像素点饱和问题的影响,在耀光饱和区域中计算得到的各像素点的偏振度明显小于周围非饱和区域中像素点的偏振度,说明解算的偏振信息出现了失真。图 6(d)为利用基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法恢复后的垂直方向光强图像计算得到的偏振度图像,与图 6(c)相比,饱和区域内偏振度值与周围非饱和区域偏振度值较为接近,说明此时计算得到的偏振度更接近真实值,从侧面验证了本文所提基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法对垂直方向光强图像耀光区域内饱和值恢复的有效性。

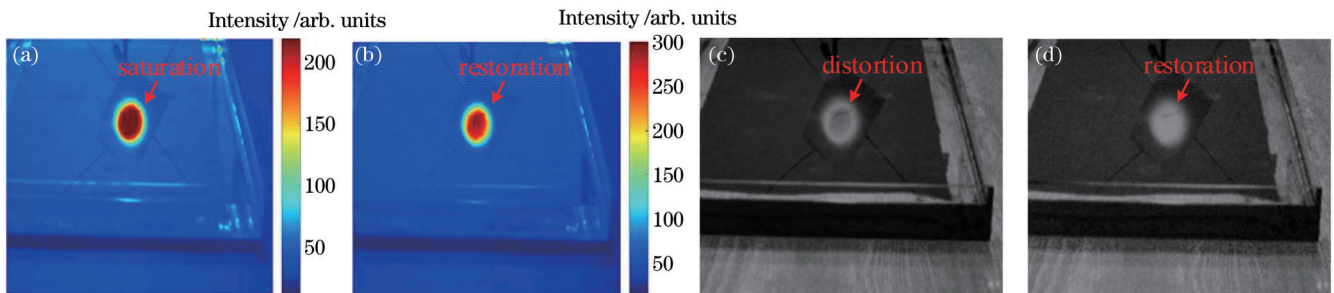


图 6 完全偏振分解算法恢复前后垂直方向图像和偏振度图像。(a)垂直方向饱和图像;(b)恢复后垂直方向图像;(c)饱和偏振度图像;(d)恢复后偏振度图像

Fig. 6 Perpendicular polarization images and polarization degree images before and after restoration with complete polarization decomposition method. (a) Saturated perpendicular polarization image; (b) restored perpendicular polarization image; (c) saturated polarization degree image; (d) restored polarization degree image

完成垂直方向饱和和光强图像的恢复后,利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法对水面耀光进行抑制。基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法的具体步骤如下:首先利用角度测量仪测量偏振探测器的俯仰角,通过俯仰角计算得到探测器相对于水面的观测角;然后根据观测角求出水面反射偏振度和折射偏振度;最后通过式(14)并利用反射偏振度、折射偏振度、垂直方向光强图像、平行方向光强图像计算水面反射光强度值和折射光强度值,计算得到的反射光强度

值是水面反射的耀光强度值,计算得到的折射光强度值就是抑制水面耀光后得到的结果。

利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法对室内获取的水面耀光图像进行抑制,耀光抑制结果如图 7 所示。图 7(a)为直接利用偏振探测器获取的垂直方向饱和光强图像和平行方向光强图像对水面耀光进行抑制后的结果,可以看出,耀光区域中偏振探测器直接获取的垂直方向光强图像存在较多的饱和像素点,导致耀光抑制效果并不理想,抑制耀光后图像中大量

像素点的强度值明显高于正常值。图 7(b)为利用基于完全偏振分解算法恢复后的垂直方向光强图像和平行方向光强图像抑制水面耀光后得到的图像,该图中耀光区域已经不存在水面镜面反射形成的强光像素点,水面耀光成分已经被完全分离干净。

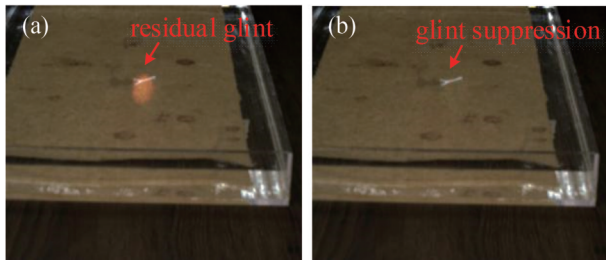


图 7 水面饱和耀光抑制结果。(a)饱和垂直方向图像直接抑制结果;(b)垂直方向图像恢复后抑制结果

Fig. 7 Suppression results of water saturation glint. (a) Direct suppression result of saturated vertical direction image; (b) suppression result after vertical direction image restoration

4.2 水面饱和耀光抑制室外实测实验

为了分析评估本文提出的基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法和基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法对于真实场景中水面饱和耀光的抑制情况,在完成室内模拟实验的基础上,又进一步开展了外场实测实验。在室外环境下,水面反射的天空散射光、云层散射光、太阳直射光等都会在水面上形成耀光区域。外场实验过程中偏振探测器观测的目标是一艘遥控潜艇,该潜艇的形状结构如图 8 所示。该潜艇能够在水里进行 6 个自由度(分别为上浮、下潜、前进、后退、左转和右转)的运动,因此具备漂浮在水面和潜游在水下

的能力,能够方便测试耀光抑制对水面目标以及水下目标的增强效果。



图 8 遥控潜艇

Fig. 8 Remote controlled submarine

图 9 为利用偏振探测器获取的水面耀光四通道光强图像,其中图 9(a)为潜艇目标为漂浮状态时获取的图像,由于目标漂浮在水面上,所以目标自身会有一部分露出水面,此时目标不会完全淹没在水面耀光杂波中。但是水面耀光的存在导致目标和背景之间区分度不明显,图像耀光噪声较为严重。图 9(b)、(c)为潜艇目标为潜浮状态时获取的图像,由于目标潜浮在水表下面,目标自身的反射光较弱,在水面耀光的干扰下,目标存在轮廓不清、细节丢失等问题,甚至会出现目标完全淹没在耀光之中的情况。图 10 为四通道光强图像中 0° 起偏角下获取的光强图像,即垂直方向光强图像。将图 10 中图像转化为灰度图,并绘制灰度图对应的伪彩色图和灰度直方图,分别如图 11 和图 12 所示。从图 10 和图 11 中可以看出,由于水面反射的耀光强度值较大,偏振探测器获取的垂直方向光强图像存在大量饱和像素点,从图 12 所示的灰度直方图中可以看出,垂直方向光强图像中饱和像素点个数远大于其他灰度等级非饱和像素点个数。由于垂直方向光强图像中饱和像素点的存在,目标完全淹没在饱和耀光中,并导致偏振信息的失真甚至丢失,这给耀光的分离和抑制带来较大的阻碍。

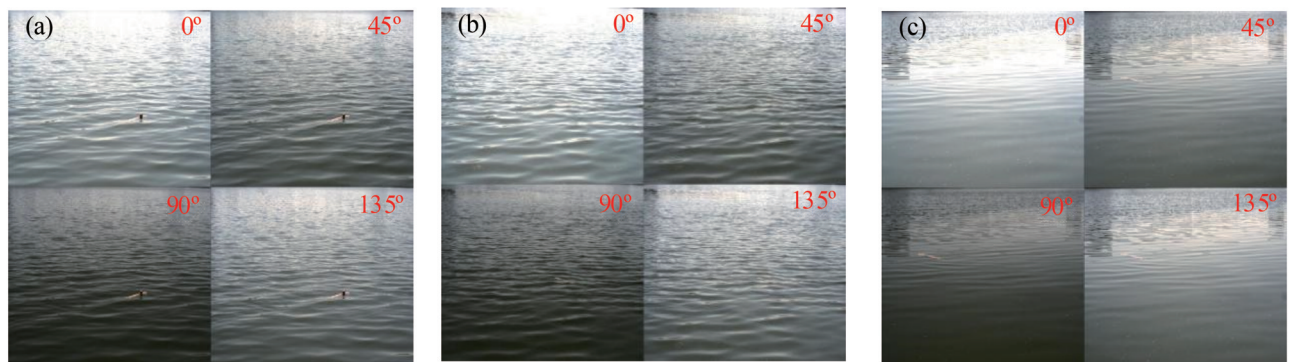


图 9 偏振探测器获取的四通道分焦平面耀光图像。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 9 Four-channel split-focus plane glint images captured by polarization detector. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法直接对偏振探测器获取的饱和光强图像进行耀光抑制,直接抑制结果如图 13 所示。由于图 13 中虚线方框包围的区域含有大量饱和和耀光像素点,在求解偏振特征时会存在信息失真问题,所以无法完全分离该区域内饱和和像素点的耀光成分,残留的耀光成分形成了亮度值较高的噪点,这些噪点给水面目标、水下目标的探测

识别造成干扰。

为了消除垂直方向光强图像饱和和失真对耀光分离结果的影响,利用基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法对垂直方向光强图像进行恢复,然后利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法对耀光进行抑制,耀光抑制结果如图 14 所示。从图 14 中可以看出,在图 13 中因像素点饱和形成的亮度值较高的噪点已经得

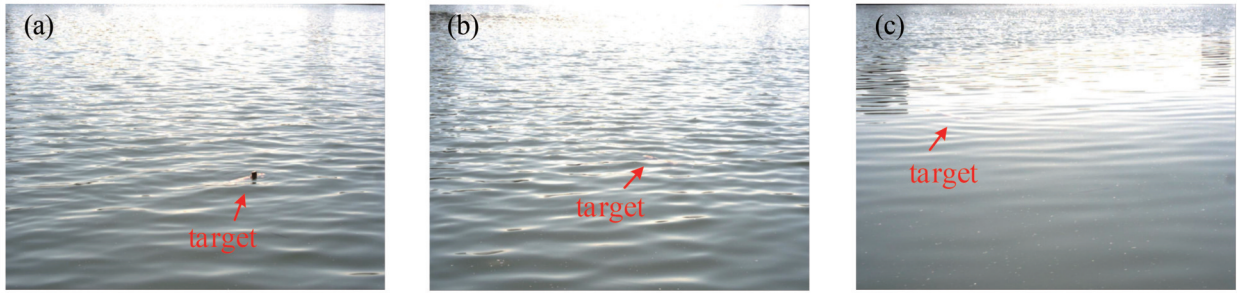


图 10 垂直方向光强图像。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 10 Perpendicular polarization images. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

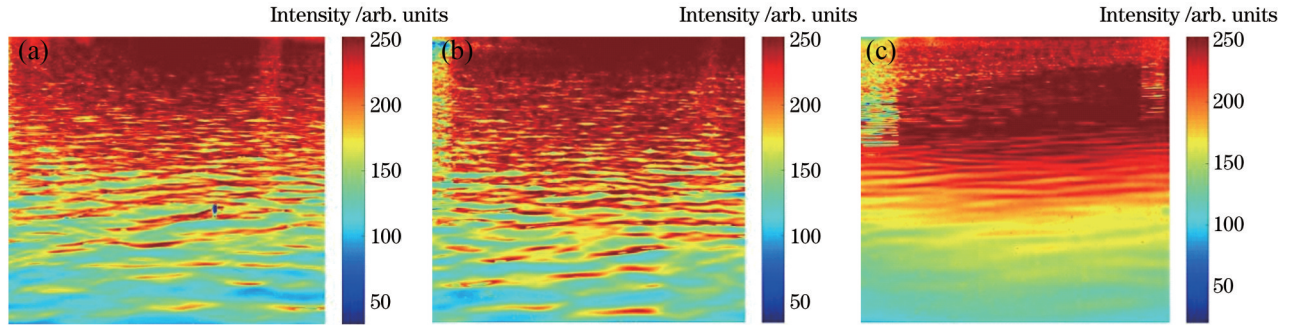


图 11 垂直方向光强图像对应的伪彩色图像。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 11 Pseudo color images corresponding to perpendicular polarization images. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

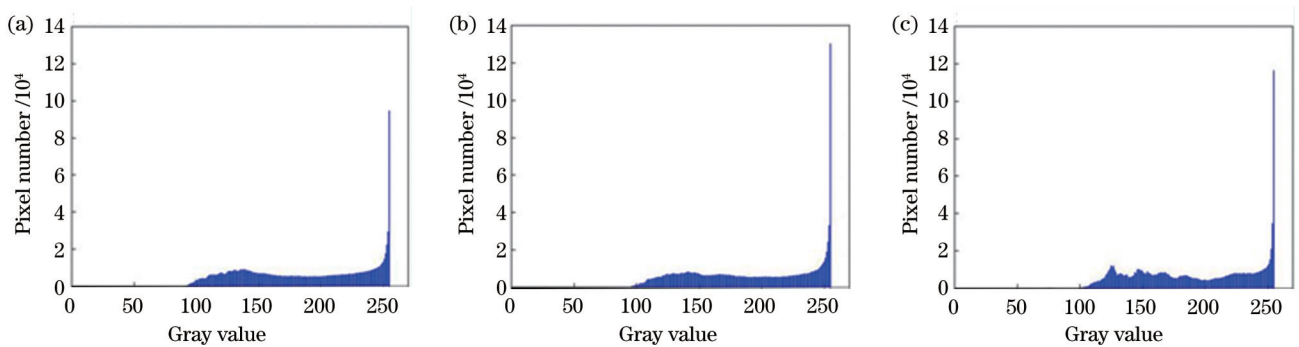


图 12 垂直方向光强图像对应的灰度直方图。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 12 Gray histograms corresponding to perpendicular polarization images. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

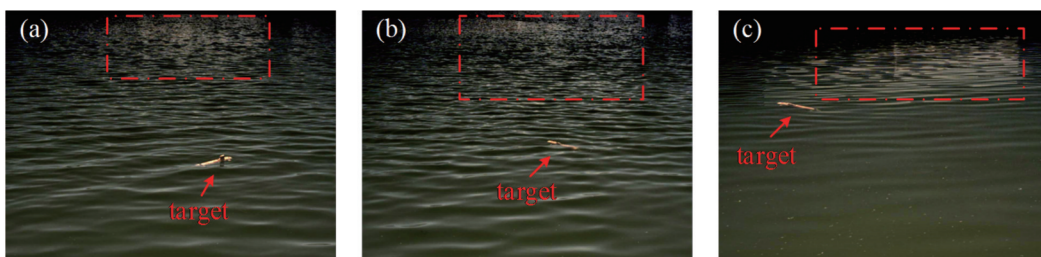


图 13 垂直方向光强图像饱和状态下的耀光抑制结果。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 13 Glint suppression results using saturated perpendicular polarization images. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

到有效抑制,表明利用本文提出的基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法能够消除饱和和失真对水面耀光抑制的影响。

为了定量评估耀光抑制对水面及水下目标的增强效果,计算比较了耀光抑制前后目标和背景之间的对

比度 C 、信噪比 R_{LSN} 变化情况,如表 1 所示。

对比度是指耀光区域中目标和背景之间的亮暗对比程度,耀光去除前后对比度变化情况能够反映耀光抑制后对目标显著性的提升效果,对比度越大,表明抑制耀光后目标显著性的提升效果越明显。信噪比指标

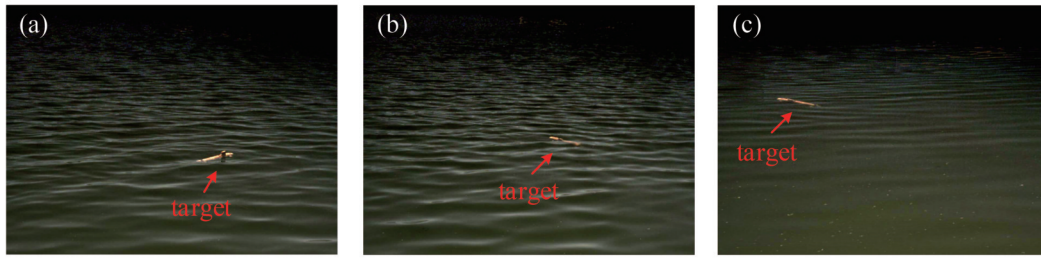


图 14 垂直方向光强图像饱和和恢复后耀光抑制结果。(a)场景一;(b)场景二;(c)场景三

Fig. 14 Glint suppression results after restoring saturated perpendicular polarization images. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 3

表 1 目标与背景之间的对比度及信噪比定量比较

Table 1 Quantitative comparisons of contrast and local signal-to-noise ratio between target and background

Glint station	Image type	C			R_{LSN}		
		Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 1	Scene 2	Scene 3
Before glint suppression	0° image	0.0028	0.0166	0.0238	-15.6125	-7.2902	-4.4086
	45° image	0.0229	0.0397	0.0271	-7.2584	-4.3801	-4.9193
	90° image	0.0808	0.0804	0.0445	-2.4557	-2.1119	-3.6459
	135° image	0.0213	0.0321	0.0284	-7.0451	-5.0115	-4.7969
After glint suppression	Saturated image	0.1888	0.1826	0.1475	0.8711	-0.0800	-1.0346
	Restored image	0.1992	0.1829	0.1931	1.4326	0.2575	1.1752

量化了目标信号和背景噪声之间的强度关系:信噪比为负值,表示背景噪声强于目标信号;信噪比为正值,表示目标信号强于背景噪声;信噪比越大,表示图像背景噪声对目标的影响越小,目标信号越强。对比度 C 和信噪比 R_{LSN} 的计算公式如下:

$$C = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\mu_T + \mu_B} \right|, \quad (23)$$

$$R_{LSN} = 10 \lg \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B}, \quad (24)$$

式中: μ_T 为目标强度平均值; μ_B 为局部背景强度平均值; σ_B 为局部背景强度标准差。

采用对比度、信噪比这两项指标对偏振探测器获取的饱和耀光四通道光强图像以及耀光分离后的图像进行定量评估,如表 1 所示,表 1 中第 1~4 行分别表示偏振探测器获取的 0°、45°、90°、135° 四通道光强图像中目标和背景对比度及信噪比指标,第 5 行表示直接对饱和耀光抑制后计算的目标和背景对比度及信噪比指标,第 6 行表示采用基于偏振完全分解的饱和光强恢复算法对饱和耀光进行抑制后计算的目标和背景对比度及信噪比指标。从表 1 中可以看出,90° 光强图像中目标和背景之间的对比度、信噪比指标均高于 0° 光强图像,验证了水面反射的耀光在垂直方向上强度值大于平行方向上强度值的结论。利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法,直接对偏振探测器获取的含饱和像素点的光强图像进行耀光抑制。抑制耀光后图像中目标和背景之间的对比度以及信噪比指标,相对于偏振探测器获取的四通道光强图像有一定的提升,说明基于偏振反折射效应的水面耀光抑制算法能够抑制水面耀光并对目标进行增强。但是,受垂直方向光

强图像饱和和失真的影响,目标对比度和信噪比提升效果有限,如场景二和场景三中提升后的信噪比指标仍然小于 0,说明耀光引起的杂波并未完全分离干净,图像中目标受背景噪声的干扰依旧较为严重。采用偏振完全分解方法对垂直方向光强图像进行恢复后,再利用基于偏振反折射效应的水面耀光抑制方法对耀光进行抑制,抑制耀光后图像中目标和背景之间的对比度以及信噪比指标均高于直接利用饱和和失真图像分离得到的结果,且耀光抑制后以上三种场景中的信噪比指标均大于 0,说明抑制耀光后目标信号强于背景杂波信号,验证了本文所提基于完全偏振分解的饱和光强恢复算法对提升饱和和耀光抑制结果的有效性。

5 结 论

光滑水面具有强烈的反射效应,水面反射的太阳光、云层散射光容易形成耀光区域,严重影响光学探测系统的成像质量,导致目标信号淹没在耀光噪声中。针对光电探测过程中存在的水面耀光干扰问题开展研究,分析了水面光波反射和折射过程中偏振特征传输规律,利用光波在垂直方向和平行方向上的光强分布关系,提出一种基于偏振反折射效应的水面耀光抑制方法,通过该方法并利用水面反射偏振度、折射偏振度、垂直方向光强值和平行方向光强值,实现了水面耀光的分离和抑制,针对垂直方向光强图像饱和和失真导致的耀光分离效果不佳的问题,提出一种基于完全偏振分解的垂直方向饱和和光强图像恢复方法,通过将垂直方向光强分解为平行方向光强和完全偏振光强之和,有效恢复出垂直方向光强图像中因耀光饱和而缺失的图像信息。实验结果表明,利用恢复后的垂直方向光强图像和平行方向光强图像对饱和耀光进行抑

制,能够消除耀光区域内因像素点饱和引起的图像噪点,水面反射形成的耀光成分被完全分离干净,耀光区域中目标和背景之间的对比度和信噪比指标得到显著提升,更有利于目标的检测和识别。

参 考 文 献

- [1] Zhang X D, He S Y, Shabani A, et al. Spectral sea surface reflectance of skylight[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A1-A13.
- [2] 张卫国. 海面太阳耀光背景下的偏振探测技术[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 231-236.
Zhang W G. Application of polarization detection technology under the background of Sun flare on sea surface[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 231-236.
- [3] 邓宇, 付强, 张肃, 等. 基于偏振检测技术的水面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 2001003.
Deng Y, Fu Q, Zhang S, et al. Method of suppressing sea surface solar flare based on polarization detection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 2001003.
- [4] 杨梅梅, 赵佩瑶, 冯斌, 等. 偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2401002.
Yang M M, Zhao P Y, Feng B, et al. Water surface Sun glint suppression method based on polarization filtering and polynomial fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2401002.
- [5] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1526001.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1526001.
- [6] Kay S, Hedley J D, Lavender S. Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(4): 697-730.
- [7] Zhao H J, Ji Z, Zhang Y, et al. Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in Sun glint[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16396-16409.
- [8] Kim S, Lee J. Small infrared target detection by region-adaptive clutter rejection for sea-based infrared search and track[J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 13210-13242.
- [9] 叶松, 屈文学, 李树, 等. 基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1001003.
Ye S, Qu W X, Li S, et al. Sea surface glint-suppression method based on the polarization time-domain characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001003.
- [10] 陈卫, 孙晓兵, 乔延利, 等. 海面耀光背景下的目标偏振检测[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S117001.
Chen W, Sun X B, Qiao Y L, et al. Polarization detection of marine targets covered in glint[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S117001.
- [11] Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): A1045-A1068.
- [12] Liang J N, Wang X, He S, et al. Sea surface clutter suppression method based on time-domain polarization characteristics of Sun glint[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2142-2158.
- [13] 陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1648-1653.
Chen X F, Gu X F, Cheng T H, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648-1653.
- [14] 陈卫, 乔延利, 孙晓兵, 等. 基于偏振辐射图融合的水面太阳耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0529001.
Chen W, Qiao Y L, Sun X B, et al. Method for water surface Sun glint suppression based on polarized radiation image fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0529001.
- [15] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarization features[J]. *IET Image Processing*, 2018, 12(11): 2042-2050.
- [16] 张景华, 张焱, 石志广. 基于长波红外的海面场景偏振特性分析与建模[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(5): 586-594.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Study and modeling of infrared polarization characteristics based on sea scene in long wave band[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(5): 586-594.
- [17] Shaw J A, Vollmer M. Blue Sun glints on water viewed through a polarizer[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): G36-G41.
- [18] Wolff L B, Boulton T E. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 635-657.
- [19] Schechner Y Y, Shamir J, Kiryati N. Polarization and statistical analysis of scenes containing a semireflector[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, 17(2): 276-284.
- [20] Kong N, Tai Y W, Shin S Y. High-quality reflection separation using polarized images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3393-3405.
- [21] Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G. Long-wave infrared polarization feature extraction and image fusion based on the orthogonality difference method[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2018, 27(2): 023021.
- [22] 赵峰, 程喜萌, 冯斌, 等. 分焦平面偏振图像插值算法的比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(16): 161014.
Zhao F, Cheng X M, Feng B, et al. Comparison research of interpolation algorithms for division of focal plane polarization image[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 161014.