

基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法

叶松^{1,2}, 屈文学^{1,2}, 李树^{1,2*}, 汪杰君^{1,2}, 王新强^{1,2}, 王方原^{1,2}, 张文涛^{1,2}, 付思梦^{1,2}¹桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;²广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 耀光是太阳光入射到海面上由海面镜面反射而成,其较高的辐射强度会造成传感器像元饱和,使得海面目标轮廓淹没在耀光中,对目标探测造成影响。基于耀光的偏振时域特性,提出一种耀光抑制方法。该方法利用实时偏振成像系统对有耀光的海面进行实时偏振测量,同时获取 0°、45°、90°三个偏振方向的偏振视频图像信息;根据不同偏振方向视频对应帧图像计算 Stokes 矢量,生成空间域耀光抑制偏振辐射图序列。对生成的图像序列进行时域融合,从而抑制耀光。搭建水面实时偏振成像观测实验平台,开展耀光背景下水面目标的探测实验。实验结果表明:对比普通线偏振图像,所提方法获得的耀光抑制图像信杂比提升显著,耀光抑制效果明显,图像中海面目标显著性得到有效增强。

关键词 海洋光学; 遥感; 同时偏振成像; 图像时域融合; 耀光抑制; 目标探测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1001003

Sea Surface Glint-Suppression Method Based on the Polarization Time-Domain Characteristics

Ye Song^{1,2}, Qu Wenxue^{1,2}, Li Shu^{1,2*}, Wang Jiejun^{1,2},Wang Xinqiang^{1,2}, Wang Fangyuan^{1,2}, Zhang Wentao^{1,2}, Fu Simeng^{1,2}¹School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;²Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract The sun glint is caused by the mirror reflection of sunlight from the sea surface. The high radiation intensity of glint saturates the sensor pixel, making the contour of the target on the sea surface lost in the sun glint, which affects the detection of the target. A method for suppressing the sun glint is proposed based on the polarization time-domain characteristics of the sun glint. The method uses the real-time polarization imaging system to polarized radiant sea surfaces in real-time and to obtain the polarization video information along three polarization directions of 0°, 45°, and 90°. Stokes vector is calculated according to the corresponding frame image with different polarization directions, and the sequence of spatial-domain glint-suppression polarization-radiation patterns is generated. The generated image sequence is fused in the time domain to suppress the sun glint. In this study, a real-time surface polarization imaging observation-experiment platform was built to conduct a detection experiment of the target surface under the glint background. The experimental results show that the signal to clutter ratio of glint suppression image obtained using the proposed method is improved compared with that of the ordinary linear polarization image; the glint suppression effect is obvious, and the saliency of the sea target in the image is enhanced.

Key words oceanic optics; remote sensing; simultaneous polarization imaging; image time-domain fusion; glint suppression; target detection

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-30; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(41961050)、广西特聘专家团队项目、广西自然科学基金(2019GXNSFBA245048)、广西科技基地和人才专项(桂科 AD19245117)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ20105)

* E-mail: lishu_owen@sina.com

1 引言

我国拥有漫长的海岸线和宽阔的海域,海洋对国家的战略价值不言而喻。基于海洋背景下的遥感科学研究也是近几年的热点研究方向之一^[1-2]。舰船作为海上交通、资源探测主要的载体和战斗力,对其进行识别与监测在军事和民事上具有深远的意义。然而,在进行海面目标探测时,当探测目标处于太阳耀光背景下,太阳耀光过高的辐射强度会使得探测器像元出现饱和,严重影响海面目标的探测有效性^[3]。耀光是太阳光经海面镜面反射后形成的^[4-5],具有强烈的偏振特性,利用偏振成像技术可以有效抑制海面耀光。研究人员们基于此特性,提出了一些耀光抑制方法。在可见光波段,耀光的主要偏振方向为水平方向,张卫国^[6]通过在探测器前安装垂直偏振片,搭建了一套探测系统以自适应滤波的方式来抑制耀光。耀光是部分偏振光,单个偏振片只能抑制部分耀光,残留耀光仍然会严重影响目标探测^[7]。Zhao 等^[8]搭建了中波红外偏振成像系统,在探测器前使用角度可调的双线偏振片,提升了耀光抑制效果。该系统的耀光抑制效果较好,但是实现起来十分复杂,仪器成本也因此增加。陈卫等^[9]使用三分束实时偏振成像技术获取偏振信息,生成区域耀光偏振辐射图,将其与偏振辐射图像融合,融合图像消除了饱和像素,但却无法显著提升目标背景对比度。目前用于抑制耀光的偏振成像技术多是应用于二维空间信号,由于二维空间耀光抑制方法只考虑当前帧,对于较为复杂的耀光背景抑制效果不佳。太阳耀光的时域特性为耀光抑制方法研究提供了新的思路,将耀光的抑制方法扩展到时域是一种行之有效的方法^[10]。Liang 等^[11]基于耀光的时域偏振特性,将偏振成像技术与时域数据处理算法相结合,使用装有可旋转线偏振片的探测器,连续采集固定角度间隔的偏振图像,进行时域内最小灰度值融合,耀光抑制效果明显。但其硬件复杂度高,图像采集时间长,易造成目标伪影。

实时偏振成像系统无运动部件,系统稳定可靠,一次成像采集就可以探测目标不同偏振态,适用于探测海面快速变化的动态目标^[12]。本文使用三分束实时偏振成像相机对目标场景进行多偏振方向的同时偏振探测以获取偏振视频,视频中时间对应的三幅线偏振图像生成一幅背景耀光空间域抑制图

像。对生成的多帧空间域耀光抑制图像进行时域融合以抑制耀光。实验证明,所提方法减少了耀光背景对目标探测效果的影响,提高了图像信杂比,实现了对耀光的有效抑制。

2 海面耀光抑制方法

耀光抑制方法包括两个阶段。首先从图像空间域角度出发,利用三分束偏振相机获取目标线偏振图像,生成偏振方向垂直于偏振角方向的偏振图,对耀光进行初步抑制。再从时域角度出发,基于耀光的时域特性,对生成的多帧偏振辐射图进行时域融合。方法流程如图 1 所示,主要由以下三部分组成。

1) 场景偏振态获取:使用三分束实时偏振成像相机对目标场景进行多偏振方向的同时偏振探测以获取偏振视频。

2) 空间域耀光抑制:利用偏振视频图像计算同一时刻目标场景的 Stokes 矢量和偏振角,再生成多帧偏振方向垂直偏振角方向的偏振强度图,该强度图称为空间域耀光抑制图。

3) 时域耀光抑制:将生成的多帧空间域耀光抑制图像组成时序图像序列,进行时域融合与灰度值拉伸,生成最后的耀光抑制图像。

2.1 场景偏振态获取

光的偏振态可以由 4 个 Stokes 参量 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 完全描述,光的偏振态可以表征光的偏振特性^[13]。设入射光的 Stokes 矩阵为

$$\mathbf{S}_1 = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T. \quad (1)$$

在多数被动偏振探测中,由于目标反射光中的圆偏振光部分占比较小,通常在计算中将 Stokes 参量 S_3 忽略^[14]。设 $I(\theta)$ 是目标入射光经过偏振方向为 θ 的线偏振片后探测器接收到的光强,则目标入射光的 Stokes 向量为

$$\begin{cases} S_0 = I(0) + I\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ S_1 = I(0) - I\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ S_2 = 2I\left(\frac{\pi}{4}\right) - \left[I(0) + I\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \end{cases}. \quad (2)$$

在规定 0° 参考方向为水平方向后,任意 θ 角度的偏振辐射光强计算公式为

$$I(\theta) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta)]. \quad (3)$$

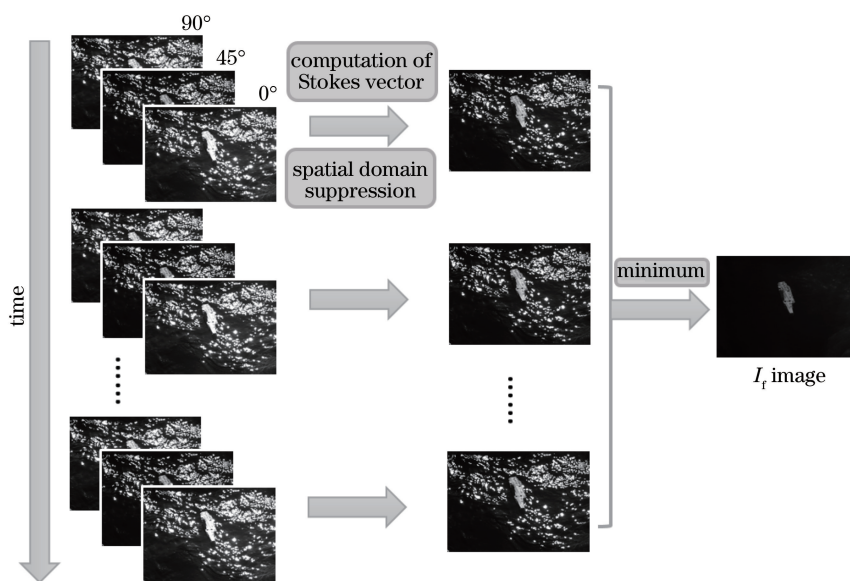


图 1 耀光抑制方法流程图

Fig. 1 Flowchart of glint suppression method

使用 Stokes 参量计算偏振角, 表达式为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right), 0 \leq \alpha \leq \pi. \quad (4)$$

2.2 空间域耀光抑制偏振辐射图生成

三分束偏振相机内置三个偏振方向分别为 0°、45°、90° 的线偏振片, 这三个偏振方向的线偏振片都会对耀光有一定的抑制作用。根据马吕斯定律, 经过偏振片到达探测器的光的强度的公式^[15]为

$$I(\theta) = I_{\text{pol}} \cos^2(\alpha - \theta) + \frac{1}{2} I_n, \quad (5)$$

式中: α 是耀光偏振角; I_{pol} 是水面反射光的偏振光部分; I_n 是反射光的非偏振光部分。根据(5)式, 线偏振片角度 $\theta = \alpha \pm 90^\circ$ 时, 可以得到 $I(\theta)$ 的最小值。当耀光偏振角 α 随耀光场景变化时, 根据(3)式可以计算出各像素点光强为 $I(\alpha \pm 90^\circ)$ 的偏振辐射图像:

$$I\left(\alpha \pm \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} \left[S_0 + S_1 \cos 2\left(\alpha \pm \frac{\pi}{2}\right) + S_2 \sin 2\left(\alpha \pm \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (6)$$

由(6)式求出耀光抑制辐射图 $I(\alpha \pm 90^\circ)$, 称为空间域耀光抑制图 I_{\perp} 。

由(2)式可知, 在计算 Stokes 向量时, 线偏振图像 I_0, I_{45}, I_{90} 对应的三个像素点中有一个或多个饱和时, 就无法准确计算该点的 Stokes 矢量。在此情况下求解 I_{\perp} 时, I_{\perp} 上该点的灰度值取三幅线偏振图中对应像素点灰度值最小者, 这样不会对抑制

结果产生影响。

2.3 偏振辐射图时域融合方法

太阳耀光的强度在时域中波动, 在给定的时间段内, 固定场景中的像素会在无闪烁、弱闪烁和完全闪烁的状态之间切换。在成像环境和探测设备不变的情况下, 耀光数量随时间变化波动不大^[11]。利用这个特性, 将取得的 I_{\perp} 组成图像序列, 进行时域融合。期望灰度值定义为每个像素在时序图像序列中非耀光状态灰度值或最弱耀光状态灰度值, 即将序列图像中对应像素的最小灰度值赋给最终的图像 $I_f(x, y)$ 。

$$I_f(x, y) = \min\{I_{\perp}(x, y, t_1), I_{\perp}(x, y, t_2), \dots, I_{\perp}(x, y, t_n)\}. \quad (7)$$

3 实验分析与讨论

3.1 耀光背景下水面目标观测实验

为验证所提太阳耀光抑制方法的有效性, 在室外开展模拟实验, 搭建海上舰船目标实景模拟平台进行偏振探测, 实验装置原理如图 2 所示。使用装满自来水的水箱模拟海面情况, 水箱内壁贴附反射率较低黑色薄膜。箱中水面浮有表面使用船舰涂漆材料的船舰模型作为模拟海上舰船目标。水箱中装有造浪水泵, 用以在水面产生波浪模拟海洋中有浪情况。通过 FD-1665 三分束实时偏振相机对目标进行观测。观测实验选择在天气晴朗的白天开展, 相机通过网线与电脑连接, 相机的启动与视频图

像的采集均由 PC 桌面软件控制, 图像采集帧率设置为 20 frame/s。

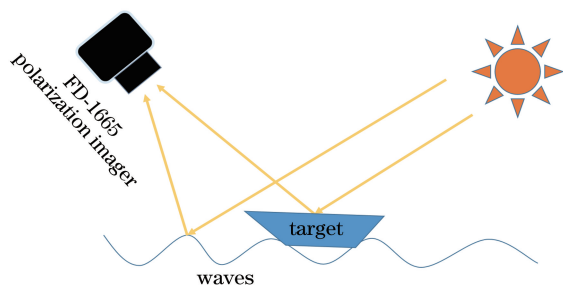


图 2 偏振测量实验装置原理图

Fig. 2 Schematic of polarization detection experimental apparatus

三分束实时偏振成像相机拥有 3 个偏振成像通道, 可同时采集偏振角度为 0° 、 45° 和 90° 的线偏振图像, 是典型的分振幅偏振成像仪^[16], 原理如图 3 所示。分振幅实时偏振成像系统一般利用分束器将入射光分为多路, 各分光光路在多个图形传感器上独立成像, 实现偏振信息的同时获取。由图 3 可知, 入射光经分束器 BS_1 和 BS_2 分为三束光后分别经过偏振方向为 0° 、 45° 、 90° 的偏振片, 由 CCD 探测器成

像。各 CCD 探测器生成偏振图像时, 所得图像强度按分束器镀膜的分光比例乘以相关系数进行校正。

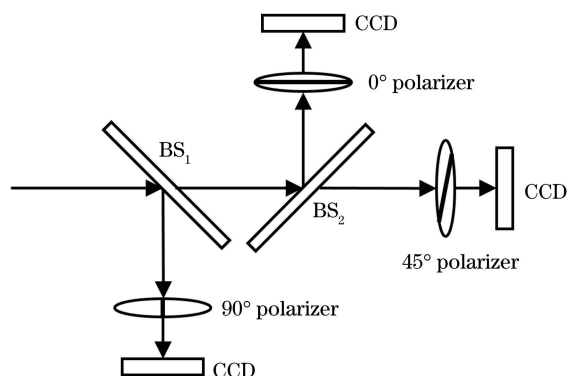


图 3 三分束实时成像偏振仪原理图

Fig. 3 Schematic of three-beam real-time imaging polarimetry

3.2 实验结果和分析

实验拍摄了时长为 0.25 s 的海面目标耀光场景偏振视频, 其中偏振相机的三个偏振成像通道各采集了 5 帧图像, 共 15 张图像。图 4(a)~(c) 分别为相机三个偏振成像角度所成的第一帧图像 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° , 图 4(d) 为强度图 I 。

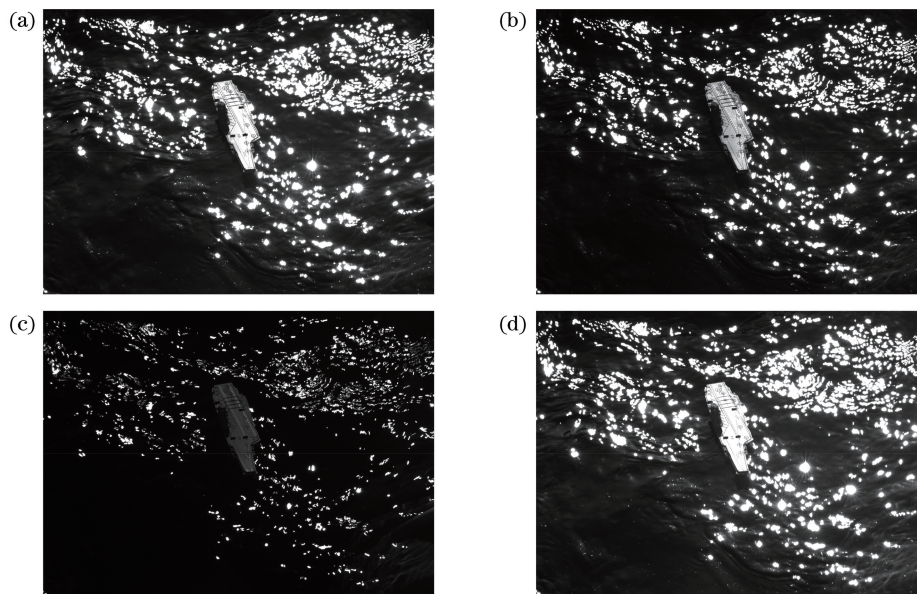


图 4 目标偏振图像及强度图

Fig. 4 Target polarization images and intensity image

从图 4(d) 可以看出, 耀光使得图像中出现大面积饱和像素, 目标轮廓与海面耀光背景之间的界限模糊不清。图像中饱和像素越多, 耀光对目标显著性的影响就越大。为了评价图像在耀光影响下的饱和程度, 表 1 统计了线偏振灰度图像和强度图的饱

和像素数及占比。线偏振图像的饱和像素数皆低于强度图, 其中图像 I_{90° 的饱和像素在图像中占比为 1.8%, 为三幅线偏振图中最小, 说明当前仪器姿态下偏振方向为 90° 的成像通道对耀光抑制效果最好。

表 1 图像饱和和像素统计

Table 1 Image saturation pixel statistics

Evaluation index	I	I_{0°	I_{45°	I_{90°	I_{\perp}
Number of saturation pixels	150023	134056	95577	23921	21614
Pixel ratio/%	11	9.9	7.1	1.8	1.6

利用偏振图像,采用空域抑制方法生成空域耀光抑制图,如图 5 所示。通过计算,得到图像 I_{\perp} 的饱和和像素占比为 1.6%,其耀光抑制效果要优于三幅原始线偏振图像。



图 5 空域耀光抑制图

Fig. 5 Spatial-domain glint suppression map

将利用室外实验得到的偏振视频图像生成的 5 帧空域耀光抑制图像组成图像序列,使用时域融合方法处理,融合过程如图 6 所示。

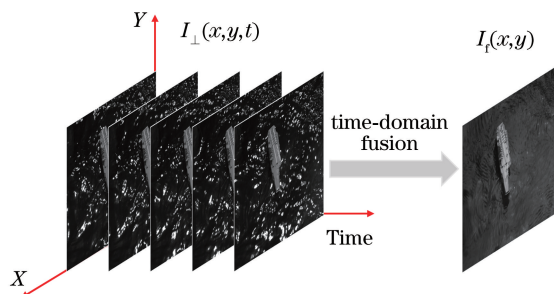


图 6 时域融合示意图

Fig. 6 Schematic of time-domain fusion

对融合图像进行灰度值拉伸后得到最终的耀光抑制图像 I_f ,结果如图 7 所示。

图像 I_f 的耀光抑制效果明显,与各偏振图像及

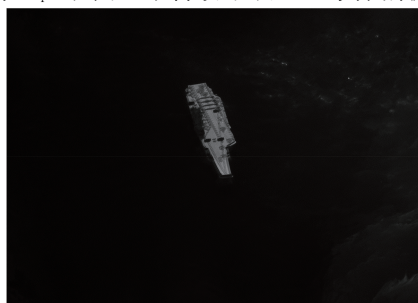


图 7 时域融合图

Fig. 7 Time-domain fusion image

I 图相比, I_f 图像中的海面目标轮廓更清晰,目标与背景的对比如^[17-18]明显更高。经统计, I_f 图像的饱和和像素数为 0,耀光剔除效果显著。

使用信杂比(SCR)、标准差(STD)等指标对融合后的时域耀光抑制图 I_f 目标显著性和耀光抑制效果进行量化分析及评价。图像的 SCR 值越大,目标的显著性就越强,STD 值越小则背景杂波抑制效果越好。SCR 计算方法为

$$R_{sc} = \frac{|\mu_t - \mu_c|}{\sigma}, \quad (8)$$

式中: μ_t 和 μ_c 分别为目标和背景杂波的强度均值; σ 为背景杂波的均方偏差。

各线偏振图和处理过后的耀光抑制图像的 STD 和 SCR 值如表 2 所示。由表 2 可知,经过耀光抑制处理后的 I_f 图像灰度标准差仅有 11.96,说明 I_f 图的灰度离散度较小,亮度均匀性好。 I_f 图像的 SCR 则达到了 5.20,图像的目标显著性突出。相较于线偏振图像中 STD 值表现最好的图像 I_{90° 和 SCR 值表现最好的图像 I_{0° , I_f 图像的 STD 值降低了 76.4%,SCR 值提升了 566.7%。表明时域耀光抑制方法得到的图像 I_f 背景杂波抑制效果相比仅由偏振片过滤得到的线偏振图像更好,目标显著性提升明显。

表 2 图像评价指标

Table 2 Image quality evaluation index

Parameter	I_{0°	I_{45°	I_{90°	I_f
STD	72.26	66.55	50.64	11.96
SCR	0.78	0.66	0.49	5.20

实验结果表明,在室外模拟实验条件下,使用三分束实时偏振成像仪对模拟海面目标及其周围波浪进行成像时,在只由偏振片过滤处理的情况下,得到的线偏振图像中有大量耀光残留,图像 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 中的目标轮廓部分淹没于背景耀光,信杂比低,目标显著性差。使用时域耀光抑制方法获取耀光抑制图像 I_f ,图像标准差只有 11.96,低于其他原始偏振图像,同时图像 SCR 达到了 5.20,显著性得到提升。因此,基于耀光偏振时域特性的抑制方法可以有效地抑制背景耀光,提升耀光背景下海面目标的显著性。

3.3 讨论

实验在室外太阳光照射下进行,视频采集阶段,各成像通道的线偏振片对入射的太阳耀光进行初步抑制,抑制效果与观测几何条件和偏振相机的姿态相关。观测几何条件不同,太阳耀光的方向反射率和偏振度就会有所变化。耀光偏振度越高,对应垂直于其偏振方向的偏振片的耀光抑制能力就越强。在条件允许的情况下,合理选择观测几何条件可以增强相机偏振片对耀光的抑制效果。任意观测几何条件下海面耀光的方向反射率和偏振度可以通过真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射模型计算。该模型可以通过 Cox-Munk 海洋表面三维模型和考虑偏振的 Fresnel 公式耦合得到^[19]。海面耀光的偏振辐射特性还受到风速和风向等因素的影响, Mobley 在文献[20]中对此进行了详细的研究。

在相同观测几何条件下,若改变偏振相机的姿态,三个偏振成像通道对耀光初步抑制能力的强弱关系将发生变化,但是由(6)式仍然可以计算得到对耀光抑制较强的空域耀光抑制图像,因此在偏振信息采集时对偏振相机姿态没有严格要求。但是为了减少后续处理的数据量,尽量使偏振相机的一个线偏振片的偏振方向与太阳光入射面平行。

所提方法基于对耀光具有一定抑制效果的线偏振图像,通过生成多帧空域耀光抑制图像后进行时域融合处理,实现最终的耀光抑制。图像的时域融合是所提方法消除背景杂波的关键因素。由于所提方法对时序图像进行处理,如果目标位置随时间变化较大,在未经图像配准处理的情况下,图像时域融合过后可能会导致目标伪影的产生。尽量缩短偏振视频采集时间,可以减少目标在不同时间所成图像之间的相对位移。所提方法利用了海面太阳耀光的动态时域特性,因此不适用于海面耀光不随时间变化的场景。

4 结论

基于耀光的偏振时域特性,利用三分束同时偏振成像相机,给出海面耀光抑制方法。所提方法使用同时成像偏振相机探测偏振信息,硬件复杂度小,成像系统稳定性高,可同时采集多个偏振角度的偏振视频图像。所提方法充分利用偏振成像技术,使用目标场景偏振信息对偏振图进行空间域耀光抑制,再结合时域处理算法,利用耀光时域特性对耀光进行抑制。为了验证所提方法的耀光抑制效果,在室外阳光下开展了水面目标偏振探测实验。实验结

果表明,所提方法对耀光背景下目标偏振图像进行处理得到的耀光抑制图的 SCR 提升明显,目标显著性得到增强,所提方法有效地抑制了背景耀光。

参 考 文 献

- [1] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2201001.
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2201001.
- [2] Chu J K, Tian L B, Cheng H Y, et al. Simulation of polarization distribution model under wavy water surfaces dominated by skylight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2001002.
褚金奎, 田连标, 成昊远, 等. 天空光主导的波浪水面下偏振分布模型仿真 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2001002.
- [3] Kay S, Hedley J, 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.
- [4] Shaw J A, Vollmer M. Blue sun glints on water viewed through a polarizer [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): G36-G41.
- [5] Ottaviani M, Merck C, Long S, et al. Time-resolved polarimetry over water waves: relating glints and surface statistics [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1638-1648.
- [6] 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.
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.
- [7] 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): 69-74.
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): 69-74.
- [8] 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.
- [9] 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.
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.
- [10] Scholl V, Gerace A. Removing glint with video processing to enhance underwater target detection[C] //2013 IEEE Western New York Image Processing Workshop (WNYIPW), November 22, 2013, Rochester, NY, USA. New York: IEEE Press, 2013: 18-21.
- [11] 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.
- [12] Liu J, Xia R Q, Jin W Q, et al. Review of imaging polarimetry based on Stokes vector [J]. Optical Technique, 2013, 39(1): 56-62.
刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, 39(1): 56-62.
- [13] Yang W, Gu G H, Chen Q, et al. Obtaining and processing of Mueller matrix image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3831-3836.
杨蔚, 顾国华, 陈钱, 等. 穆勒矩阵图像的获取及处理[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3831-3836.
- [14] Scott Tyo J, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [15] Clarke D, Grainger J G, Jr Major S S. Polarized light and optical measurement [J]. American Journal of Physics, 1972, 40(7): 1055-1056.
- [16] Huang W J. Research on pre-processing methods of dispersive simultaneous imaging polarization camera [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
黄文娟. 三分束同时成像偏振相机预处理方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [17] Wang X, Liang J A, Long H B, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(7): 0704002.
王霞, 梁建安, 龙华宝, 等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0704002.
- [18] Guan J G, Cheng Y Y, Chang G L. Time-domain polarization difference imaging of objects in turbid water[J]. Optics Communications, 2017, 391: 82-87.
- [19] 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.
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.
- [20] Mobley C D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces [J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4828-4849.