

文章编号 1004-924X(2024)10-1456-14

基于偏振特征区域分解的耀光抑制方法

段 锦*, 方瑞森, 陈广秋, 王佳林, 莫苏新, 郭培仁
(长春理工大学 电信学院, 吉林 长春 130022)

摘要:海面探测领域中,太阳耀光导致光电探测设备大面积像元饱和,严重妨碍了海面目标的信息采集工作。为了对太阳耀光进行抑制,提出基于偏振特征区域分解的耀光抑制方法。该方法通过分析探测器对偏振数据的采集情况,将耀光区域进行特征分解。对偏振非饱和耀光区域,通过完全偏振分解方法解算去偏振分量图像,滤除部分反射光,恢复耀光遮蔽区域场景信息。同时设置灰度容限,剥离偏振饱和耀光区域。针对偏振饱和耀光区域采集数据失真的问题,采用 FMM 图像修复算法,将非耀光区域水面信息扩散到耀光区域,重建灰度数据。本文在室内搭建耀光模拟及偏振成像平台,对采集图像进行算法测试。实验结果表明:抑制后的图像,饱和像素数平均降低了 99.98%,基本消除了饱和像素。同时灰度均值降低了 59.35%,并显著提高了信噪比。验证了本文方法对耀光杂波抑制的有效性与可行性。

关键词:太阳耀光;偏振特征;完全偏振分解;耀光分离;FMM 修复

中图分类号:O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243210.1456

A method for suppressing glare based on polarization feature region decomposition

DUAN Jin*, FANG Ruisen, CHEN Guangqiu, WANG Jialin, MO Suxin, GUO Peiren

(School of Telecommunications, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: duanjin@vip.sina.com

Abstract: In the field of sea surface detection, solar flares cause a large area of pixel saturation in photo-electric detection equipment, seriously hindering the information collection work of sea surface targets. In order to suppress solar flares, a flare suppression method based on polarization feature region decomposition was proposed. This method decomposed the characteristics of the flare area by analyzing the collection of polarization data by the detector. For the polarization unsaturated glare region, the polarization component image was solved using the complete polarization decomposition method to filter out some reflected light and restore the scene information of the glare obscured area. Simultaneously we set the gray-scale tolerance and peel off the polarization saturated glare area. In response to the problem of data distortion in polarization saturated glare areas, FMM image restoration algorithm was adopted to diffuse water surface information from non glare areas to glare areas and reconstruct grayscale data. This article built a dazzling simulation and polarization imaging platform indoors, and conducted algorithm testing on the collected images. The experimental results show that the suppressed image reduces the number of saturated

收稿日期:2023-12-18;修订日期:2024-01-17.

基金项目:国家自然科学基金重大仪器专项(No. 62127813);吉林省科技发展计划项目(No. 20220508152RC)

pixels by 99.98% and basically eliminates saturated pixels. At the same time, the average grayscale decreased by 59.35%. The effectiveness and feasibility of the method proposed in this article for suppressing dazzling clutter have been verified.

Key words: sun flare; polarization characteristics; complete polarization decomposition; flare separation; FMM repair

1 引 言

太阳耀光是海洋探测作业中常见的自然现象^[1-2],光电探测设备在对船舶、浮标、溺水人员等海面物体进行成像与探测时,部分水体区域会受到耀光的干扰,导致光电探测设备大面积像元饱和,影响采集图像的质量,干扰探测设备对海面目标信息的获取。因此,针对海面耀光的抑制工作成为海洋国防领域的研究热点^[3-4]。

偏振是太阳辐射的四大基本物理属性之一。太阳辐射在到达介质表面发生反射、散射或折射后,呈现出不同程度的偏振状态,而该偏振状态恰恰对应着界面或介质的某种物理状态和化学性质^[5]。相关研究表明,反射耀光具有明显的偏振特性^[6]。Fougnie 等人通过模拟计算和测量实验发现采用平行偏振片可以有效地抑制水表反射耀光,提高离水辐射的测量精度^[7]。Cooper 等人的研究表明,海上目标与背景海水之间存在显著的偏振特性差异,为耀光抑制提供了新的思路^[8]。邓宇等人分析了观测天顶角、太阳天顶角对太阳耀光背景下海面目标偏振度以及海面目标与太阳耀光背景对比度的影响,对于优选的探测器观测角度给出了指导性意见^[9]。刘志刚等基于 Cox-munk 模型计算了太阳耀光的偏振度、垂直和平行分量的偏振反射率^[10]。

相关研究者利用耀光的偏振特征提出了不同的海面耀光抑制方法。这些方法主要可以分为两部分:基于偏振机理的耀光抑制方法和偏振结合图像处理技术的耀光抑制方法。在基于偏振机理的耀光抑制方法方面,陈卫等人^[11]设计了一种基于双线偏振片的可见光探测系统,通过双偏振片对耀光强度进行了一定的抑制,其机械结构简单且具有良好的抑制效果,但探测器前两个偏振片之间的最佳角度难以确定。张景华等人^[12]通过完全偏振分解的方法对垂直方向偏振图像进行重建,并基于菲涅尔方程对反反射光进

行光学解耦,通过恢复折射光图像达到耀光抑制的效果,该方法的时间复杂度较低且显著提高了目标背景对比度。张聪立等人^[13]基于太阳耀光和目标信息光的偏振特性差异构建光成分解耦分离模型,利用水体衰减系数对目标信息光偏振度进行修正,最终实现针对水下目标的耀光抑制工作。在偏振结合图像处理技术的耀光抑制方法方面,陈卫等人^[14]提出了一种基于偏振辐射图融合水面太阳耀光抑制方法,通过计算区域平均偏振角,生成区域耀光抑制偏振辐射图并与所选偏振辐射图进行 PCA 融合,有效抑制了耀光强度。杨梅梅等人^[15]通过建立图像像素位置与灰度的相关等式,将高灰度像素点作为待拟合区域并利用最小二乘法进行拟合,对耀光区域进行抑制,但该方法的计算过程复杂,计算速度较慢。

同时,上述方法多对偏振维度上饱和的耀光区域采用了回避的态度,又未能对耀光区域进行合理的分割与处理,因此在面向强反光场景下的耀光抑制工作存在限制。事实上,由于耀光的饱和特征与探测设备的限制,对于采集数据中在偏振维度上仍表现为饱和的耀光区域,其偏振信息失去了与真实光场之间的对应关系,导致以偏振数据为基础的光学特征函数无法对该区域进行正确的表征,仅利用偏振特性难以进行有效抑制。因此,本文提出一种基于偏振特征区域分解的海面耀光抑制方法,利用耀光的饱和特征与偏振特性,对耀光区域进行特征分解。对偏振非饱和耀光区域,采用偏振抑制策略,恢复耀光遮蔽区域场景信息;对偏振饱和耀光区域,采用分离-修复策略,利用图像修复方法进行像素重建;最终实现强反光场景下海面太阳耀光的抑制工作。

2 耀光抑制方法

2.1 太阳耀光偏振特性

平静水面太阳光的反射辐射遵从理想镜面

反射,可以通过 Fresnel 方程将反射辐射分解为电场振动面垂直于入射面的 s 波与垂直于入射面的 p 波^[11]:

$$\begin{cases} r_s = \frac{\cos \theta_i - \frac{n_2}{n_1} \cos \theta_t}{\cos \theta_i + \frac{n_2}{n_1} \cos \theta_t} \\ r_p = \frac{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta_i - \cos \theta_t}{\frac{n_2}{n_1} \cos \theta_i + \cos \theta_t} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: r_s 为 s 波的反射系数; r_p 为 p 波的反射系数; n_1 为空气折射率; n_2 为海水折射率; θ_i 为太阳光入射角; θ_t 为太阳光透射海水后的折射角。

根据 Snell 定律:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t. \quad (2)$$

将式(1)表示为以下形式:

$$\begin{cases} r_s = \frac{N \cos \theta_i - \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_i}}{N \cos \theta_i + \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_i}} \\ r_p = \frac{\cos \theta_i - N \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + N \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_i}} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, $N = \frac{n_2}{n_1}$ 。

将空气折射率(本文取 1.03)与海水折射率(本文取 1.33)代入式(3)即可求得不同太阳光入射角下 s 波与 p 波的反射率随太阳天顶角变化曲线如图 1 所示。

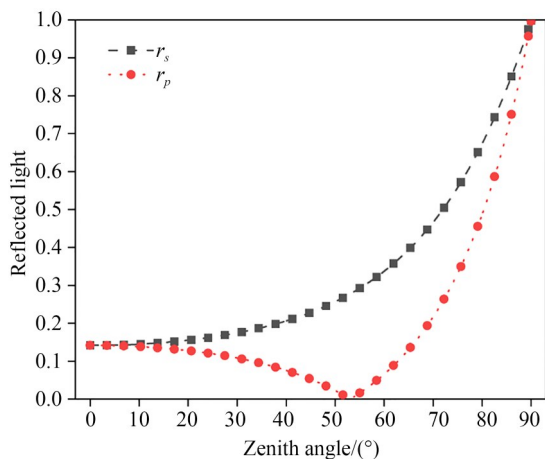


图 1 r_s 与 r_p 随太阳天顶角变化仿真

Fig. 1 Simulation of r_s and r_p with sun zenith angle

太阳耀光是水面反射光,属于部分偏振光,其偏振度可用式(4)衡量^[15]:

$$P = \left| \frac{r_s^2 - r_p^2}{r_s^2 + r_p^2} \right|, \quad (4)$$

其中, P 为偏振度。

将式(3)代入式(4)可求得不同太阳光入射角下,反射辐射的偏振度变化情况如下:

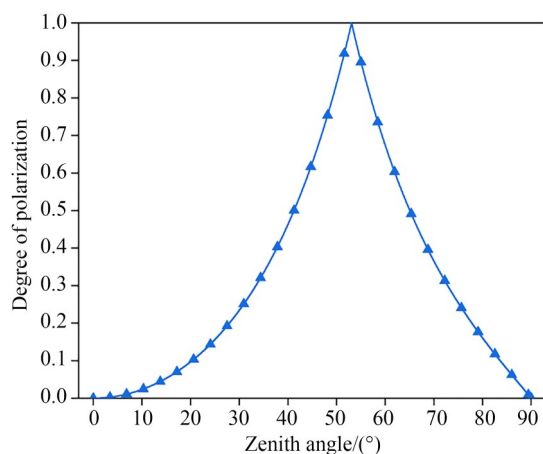


图 2 偏振度随天顶角变化仿真

Fig. 2 Simulation of the degree of polarization with sun zenith angle

图 1 和图 2 为平静水面时,不同太阳光入射角下,反射辐射中 s 波与 p 波的反射系数和偏振度的变化情况。从图中可以看出,当太阳光入射角约为 53°(布儒斯特角)时,p 波的反射率为 0,此时仅有 s 波分量,偏振度数值为 1,反射光为完全线偏光。此时利用平行偏振片即可滤除水面反射光,保留目标反射光。

但实际采集场景下难以保证太阳光以布儒斯特角入射,太阳反射光一般表现为部分偏振光,利用平行偏振片仅能滤除部分反射光。同时,太阳耀光偏振方向受风速、风向和太阳天顶角等因素影响,该方法的耀光抑制效果受到限制,且太阳耀光的平行偏振分量仍可能使光电探测器的像元饱和。

2.2 耀光区域特征分解

Stokes 矢量可以完备地表征光束的偏振状态^[16],它利用 I, Q, U, V 四个参量对光束的偏振

特性进行描述。其表示形式如下:

$$\mathbf{S}_0 = [I, Q, U, V]^T, \quad (5)$$

其中: $\mathbf{S}_0$ 表示光束; I 为总光强; Q 为 0° 与 90° 方向的偏振强度差; U 为 45° 方向与 135° 方向的偏振强度差; V 为左旋与右旋圆偏振强度差^[17], T 表示转置。由于自然界中圆偏振分量极小可以忽略不计,故后续不考虑圆偏振分量的影响。

目标入射光通过偏振角度为 θ 的线性偏振片后探测器接收的光强为 $I(\theta)$,探测器入射光的Stokes参量计算公式如式(6):

$$\begin{cases} I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I(0) + I\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ Q = I_{0^\circ} - I_{90^\circ} = I(0) - I\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ U = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} = I\left(\frac{\pi}{4}\right) - I\left(\frac{3\pi}{4}\right) \end{cases} \quad (6)$$

基于Stokes矢量计算偏振度公式如下:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} = \frac{\sqrt{\left(I(0) - I\left(\frac{\pi}{2}\right)\right)^2 + \left(I\left(\frac{\pi}{4}\right) - I\left(\frac{3\pi}{4}\right)\right)^2}}{I(0) + I\left(\frac{\pi}{2}\right)} \quad (7)$$

同时偏振度的也可以作为量化光束在不同偏振角度下光强的变化程度,其可以通过下式进行表征:

$$P = \frac{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I_{\max}(x, y) + I_{\min}(x, y)}, \quad (8)$$

其中: (x, y) 为像素位置; $I_{\max}(x, y)$ 为位于 (x, y) 点像素在不同偏振角度下灰度的最大值; $I_{\min}(x, y)$ 为位于 (x, y) 点像素在不同偏振角度下灰度的最小值。

耀光区域辐射强度与偏振信息的获取和实际场景之间的反演可能存在偏差,对于某一像素点 $I(x, y)$, $I_{\max}(x, y)$ 与 $I_{\min}(x, y)$ 分别表征该像素点在不同偏振角度下灰度的最大值与最小值,因此光学探测器对偏振数据的采集情况可以分为以下三种:

(1)当 $I_{\max}(x, y)$ 和 $I_{\min}(x, y)$ 均未饱和时,探测器可对像素偏振参量进行准确测量;

(2)当 $I_{\max}(x, y)$ 饱和而 $I_{\min}(x, y)$ 未饱和时,偏振参量测量结果将会出现误差, P 与Stokes矢量的计算将不准确;

(3)当 $I_{\max}(x, y)$ 和 $I_{\min}(x, y)$ 均饱和时,根据式(8)可计算偏振度结果为0,像素偏振信息完全丢失。

本文将像素点由 $I_{\min}(x, y)$ 组成的图像称为去偏振分量图像。后续若不做特殊说明, $I_{\max}$ 与 $I_{\min}$ 均指代图像。

假设 $I_{\max}$ 图像与 $I_{\min}$ 图像已知,结合 $I_{\min}$ 定义与偏振数据采集情况分析,对耀光区域进行特征分解如下:

$$L_S = \{I_{\min}(x, y) > A\}, \quad (9)$$

$$L_{NS} = \{I_{\max}(x, y) > A \& I_{\min}(x, y) \leq A\}, \quad (10)$$

其中: L_S 称为偏振饱和耀光区域; L_{NS} 为偏振非饱和耀光区域; A 为灰度容限。

针对彩色偏振图像中海面目标的颜色信息对分离效果的干扰问题,本文采用暗通道策略将式(9)和式(10)进行优化如下:

$$L_S = \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} I_{\min}(x, y) > A \right\}, \quad (11)$$

$$L_{NS} = \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} I_{\max}(x, y) > A \& \min_{c \in \{r, g, b\}} I_{\min}(x, y) \leq A \right\} \quad (12)$$

偏振非饱和耀光区域像素点的偏振信息采集情况对应着采集情况1与采集情况2,该部分像素的偏振信息与实际反演的差别程度较小,且在 $I_{\min}$ 图像中非饱和。因此求解 $I_{\min}$ 图像的过程即为偏振非饱和耀光区域的抑制过程。

偏振饱和耀光区域像素点的偏振信息采集情况对应采集情况3,其偏振信息失去了与原有场景信息反演的对应关系,偏振光学特征函数难以对该部分区域进行有效抑制。因此本文采用分离-修复策略,利用图像修复技术重建其灰度信息,降低耀光的背景显著度。

综上,本文方法流程图如图3所示。

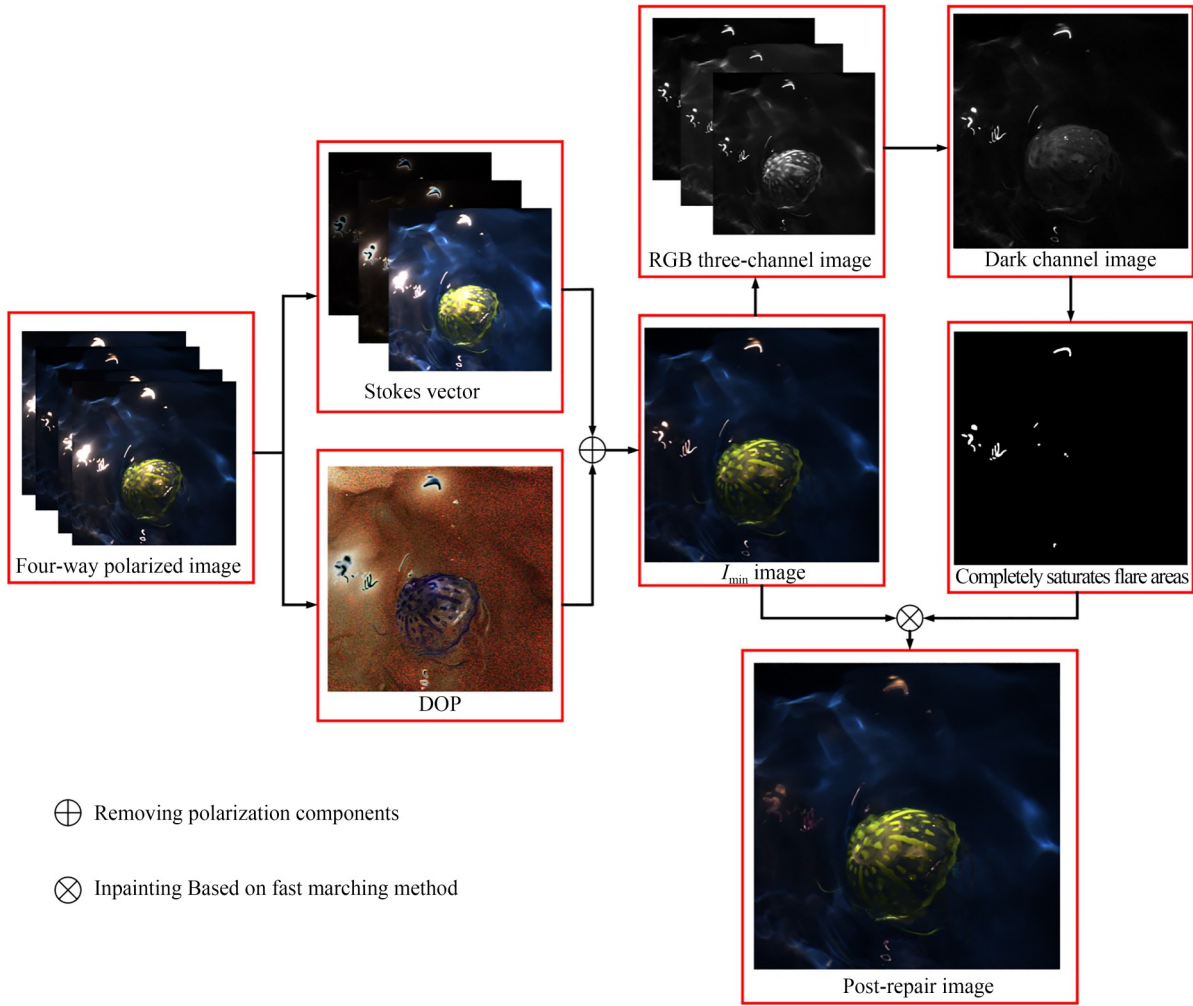


图3 方法流程图

Fig. 3 Methodology Flow Chart

2.3 偏振非饱和耀光抑制方法

求解 $I_{\min}$ 图像为偏振非饱和耀光区域的抑制过程,本文基于完全偏振分解方法结合 Marius 定律对 $I_{\min}$ 图像进行求解过程如下:

在忽略圆偏振分量的前提下,可以将光束分解为线偏振光与非偏振光的线性叠加^[12]:

$$I = I_{\text{NP}} + I_{\text{LP}}, \quad (13)$$

其中: I 为光束; I_{NP} 为光束中的非偏振辐射分量; I_{LP} 为光束中的线偏振辐射分量。

光束的偏振度由式(14)给出:

$$P = \frac{I_{\text{LP}}}{I_{\text{NP}} + I_{\text{LP}}}. \quad (14)$$

光束经过偏振片后的光强变化遵循马吕斯定律:

$$I(\alpha_i) = \frac{1}{2} * I_{\text{NP}} + I_{\text{LP}} * \cos^2(\alpha_0 - \alpha_i), \quad (15)$$

其中: α_0 为线偏振分量的偏振方向; α_i 为偏振片角度。

根据马吕斯定律,构建 $I_{\text{NP}}(x, y)$, $I_{\text{LP}}(x, y)$, $I_{\min}(x, y)$, $I_{\max}(x, y)$ 的关系如下:

$$\begin{cases} I_{\min}(x, y) = \frac{1}{2} I_{\text{NP}}(x, y) \\ I_{\max}(x, y) = \frac{1}{2} I_{\text{NP}}(x, y) + I_{\text{LP}}(x, y) \end{cases}, \quad (16)$$

其中, (x, y) 表示像素点的位置。

将式(13), 式(14)代入式(16), 求解可得:

$$\begin{cases} I_{\min}(x, y) = \frac{1}{2} * I(x, y) * (1 - P(x, y)) \\ I_{\max}(x, y) = \frac{1}{2} * I(x, y) * (1 + P(x, y)) \end{cases}. \quad (17)$$

综上,本文完成了对 $I_{\min}$ 图像的解算工作。

2.4 偏振饱和和耀光抑制方法

针对偏振饱和和耀光区域的抑制工作可以抽象为图像划痕或散点的修复问题。本文将该部分区域作为数据缺损区域,并利用基于快速行进方法(Fast March Method, FMM)^[18]的图像修复算法对该区域进行像素重建。该方法具有实现简单快速,针对划痕与散点等小面积缺损区域的修复效果好等优点,适用于针对散点耀光的修复。

基于快速行进方法的图像修复算法属于小尺度缺损的图像修复技术,这种方法是基于等照度线扩散的一种图像修复方法,其主要思想是采用非线性扩散将图像待修复区域周围的已知信息各向异性地扩散至修复边界,这一过程通过变分偏微分方程模型(Partial Differential Equations, PDE)实现^[19-20]。该方法基本思想是先对待修复区域边界上的点进行修复,然后层层推进,直至完成所有像素点的修复工作,其基本原理如下图4所示^[21]。

图4中: Ω 为待修复区域, P 为 Ω 边界上一点, $B(\epsilon)$ 为以 P 为中心选取的一个小邻域, $B(\epsilon)$ 内的像素值已知, q 为内的一点, q 对 P 像素值的推算如式(18)所示^[22-23]:

$$I_q(P) = I(q) + \nabla I(q)(P - q). \quad (18)$$

而根据与 P 点的距离不同, $B(\epsilon)$ 内不同像素点所占的权重也不同, P 点像素值由式(19)得出:

$$I(P) = \frac{\sum_{q \in B_\epsilon(P)} w(P, q) * [\nabla I(q)(P - q)]}{\sum_{q \in B_\epsilon(P)} w(P, q)}, \quad (19)$$

其中: $w(P, q)$ 为权重参数,与 q 点的位置相关,具体下式所示:

$$w(P, q) = \text{dir}(P, q) * \text{dst}(P, q) * \text{lev}(P, q), \quad (20)$$

$$\begin{cases} \text{dir}(P, q) = \frac{P - q}{\|P - q\|} * N(P) \\ \text{dst}(P, q) = \frac{d_0^2}{\|P - q\|^2} \\ \text{lev}(P, q) = \frac{T_0}{1 + |T(P) - T(q)|} \end{cases}, \quad (21)$$

$$N = \nabla T \quad (22)$$

其中, d_0 和 T_0 分别为距离参数和水平集参数,一般都取1^[22]。

$\text{dir}(P, q)$ 为方向因子,其保证了越靠近法线方向的像素点所占权重越大; $\text{dst}(P, q)$ 为几何距离因子,其保证了像素点离 P 点越近,所占权重越大; $\text{lev}(P, q)$ 为水平距离因子,其保证了像素点离过点 P 的待修复区域轮廓线越近,所占权重越大^[23]。

值得注意的是,由于该方法属于小尺度缺损的图像修复技术,当视场中待修复区域占比较大时,修复效果不佳。然而,由于本文结合偏振抑制方法,可以对耀光区域进行有效的初步抑制,降低视场中饱和耀光的占比,为图像修复创造了有利条件。

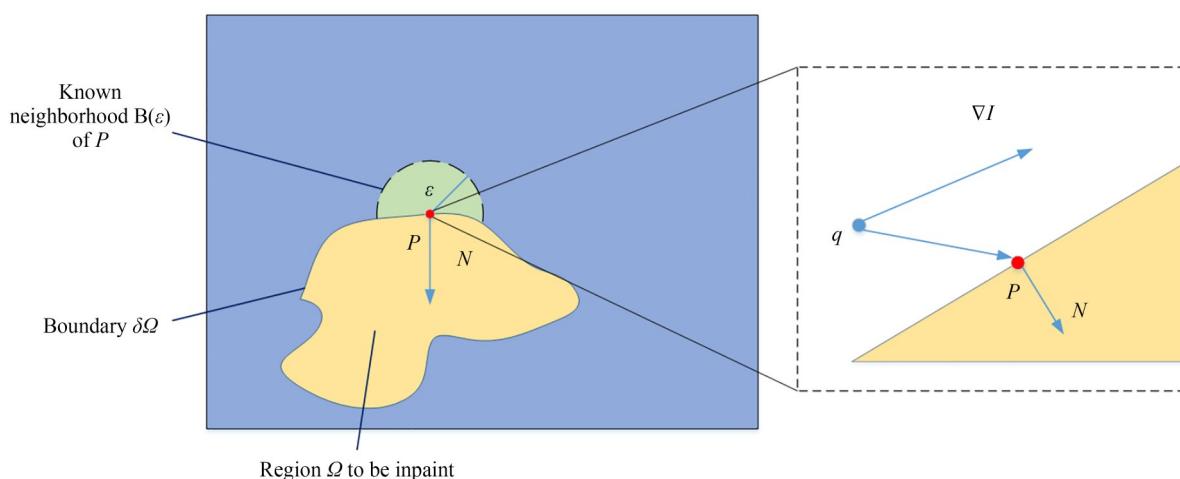


图4 FMM算法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of FMM algorithm

3 海面耀光抑制实验

3.1 实验设计

为了对本文算法的有效性进行验证,本文搭建室内耀光模拟及偏振成像平台如下:

在进行室内耀光模拟及偏振成像实验时,本文选取实验器材包括玻璃水箱、分焦平面偏振相机(DOFP)、探照光源、待测目标、造浪泵和光学支架。其中,造浪泵用于制造波浪水面,以模拟有风水面场景,扬程为 3 m/s;光学支架用于固定

与控制光学探照灯的入射角度;光学探照灯用于模拟太阳直射光,光源为平行线型光源;潜艇模型、水母模型、木板等则作为待检测目标;探测器选用大恒光电的 MER2-502-79U3M POL 分焦平面相机,其传感器为索尼 IMX-250-MZR,分辨率为 $2\,448 \times 2\,048$,传感器像元尺寸为 $3.45\ \mu\text{m}\ (H) \times 3.45\ \mu\text{m}\ (V)$ 。其内部通过四个不同取向上对准的 2×2 像素化偏振器级联组成,具有良好的时间同步性,可以同时采集 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向的偏振图像^[24-26]。



图 5 室内耀光模拟及偏振成像平台

Fig. 5 Indoor flare simulation and polarization imaging platform

根据文献[9]与文献[10]研究可知,水面耀光偏振探测时,当传感器在太阳的镜面反射方向,观测天顶角在 53° 附近,且与太阳天顶角之和为 106° 附近时,对太阳耀光的抑制效果较好。因此本文选择太阳天顶角为 50° ,观测天顶角为 50° ,相对方位角 180° 进行水面数据采集。

本文首先通过光学支架固定光学探照灯天顶角为 50° ,将光束照射到水箱之中,并利用造浪泵制造水面波纹,模拟有风水面。调整分焦平面偏振相机姿态以天顶角 50° ,方位角 180° 对偏振数据进行采集。利用式(6),式(7)解算 Stokes 矢量与偏振度数据,并利用式(17)计算 $I_{\min}$ 图像。为了分离偏振饱和耀光区域,对 $I_{\min}$ 图像提取暗

通道,以排除颜色信息对偏振饱和耀光区域剥离的影响。

本文所针对场景为太阳耀光的高能辐射导致部分像元近乎饱和,在该场景下,耀光像素并不都是以饱和像素值 255 出现,在部分场景中,像素值低于 255 但高于某一阈值时,仍会对光学成像产生干扰,在图像中体现为噪声。对于灰度容限 A 的选取,本文秉持着严谨的态度,进行了多次实验,并针对该问题,参考了文献[14]和文献[15]论文中对于耀光灰度集中分布的结论,结合本文实验场景,设定本文灰度容限 A 为 220。本文所述的灰度容限值的选定可以根据实验场景的不同及成像受到干扰程度的不同,进行灵活调

整,来达到相对较好的耀光分离效果。最后本文通过 FMM 图像修复算法对 $I_{\min}$ 图像中的偏振饱和和耀光区域进行抑制,得到结果图像。

3.2 实验分析

基于室内耀光模拟及偏振成像平台采集四方向偏振图像如图 6 所示。从图中可以看出,经平行偏振片抑制后的 90° 方向偏振图像中,耀光

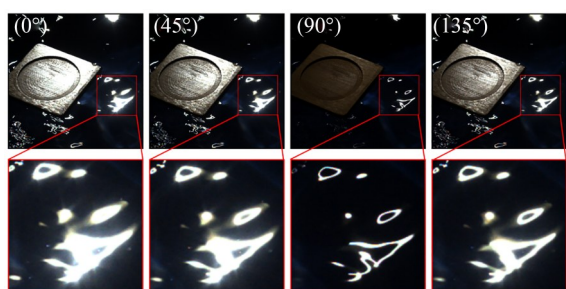


图 6 四方向偏振图像

Fig. 6 Four directional polarization image

区域得到一定抑制,但仍存在部分饱和耀光,难以剔除。这与 2.1 节的分析相印证。

基于四方向偏振图像解算偏振度 P 如图 7(a) 所示(彩图见期刊电子版),从图中红框区域可以看出,部分耀光区域在偏振度图像中表现为纯黑色,即偏振度计算结果为 0。该部分像素对应探测采集情况 3,即偏振饱和和耀光。同时偏振饱和和耀光区域周围的灰白区域,对应着在某些偏振角度下饱和的偏振非饱和和耀光区域。基于偏振度与 Stokes 矢量解算 $I_{\min}$ 图像如图 7(b)。从图像可以看出,通过去除偏振分量的方法可以抑制偏振非饱和和耀光区域,有效地降低视场中饱和和耀光的占比。经计算, 0° 偏振图像中像素点灰度值大于 A 的像素占比为 12.25%,而该占比在 $I_{\min}$ 图像中下降到 0.46%,这为后续的图像修复创造了良好的条件。

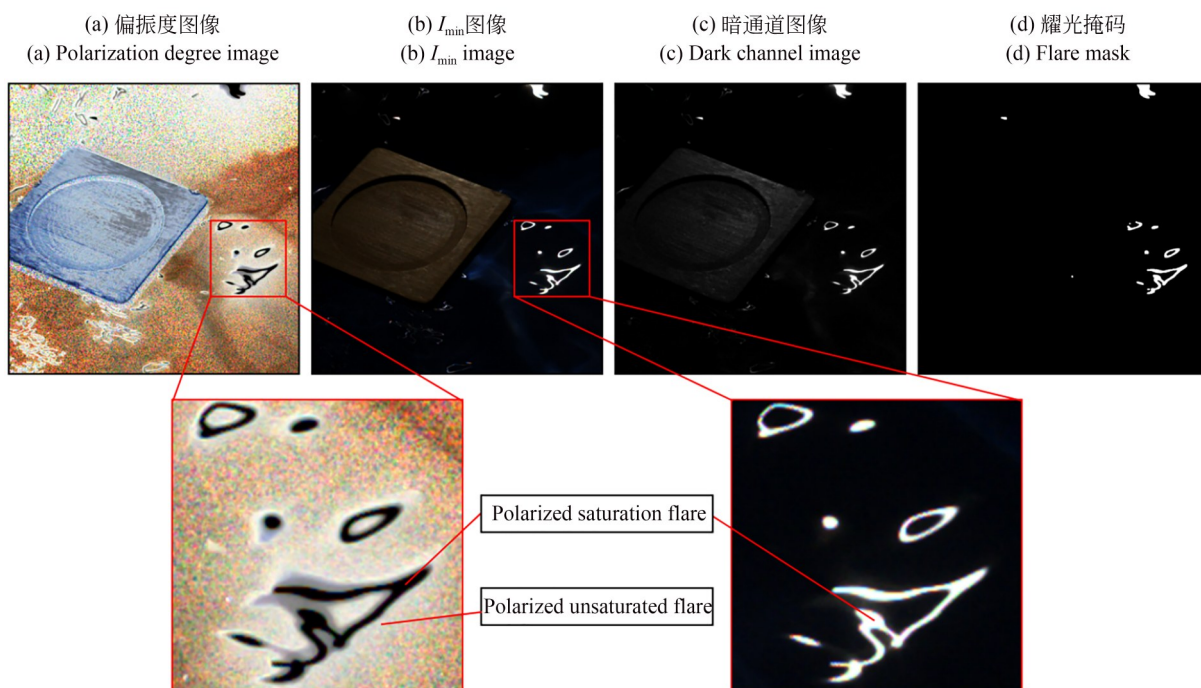


图 7 图像解算与分离

Fig. 7 Image calculation and separation

对于偏振饱和和耀光区域,由于偏振度信息的测量与计算结果并不准确,因此基于偏振机理的耀光抑制方法难以对该部分区域进行有效抑制。本文采用分离-修复思想,提取 $I_{\min}$ 图像暗通道,以减少颜色信息对分离效果的影响,并设置灰度容

限为 220,剥离偏振饱和和耀光区域如图 7(d)。

利用 FMM 图像修复算法对偏振饱和和耀光区域进行修复结果如图 8(c) 所示,同时与 0° 偏振图像(后续简称原图像)和 $I_{\min}$ 图像进行对比。观察对应红框区域与直方图可以发现,原图像中饱和

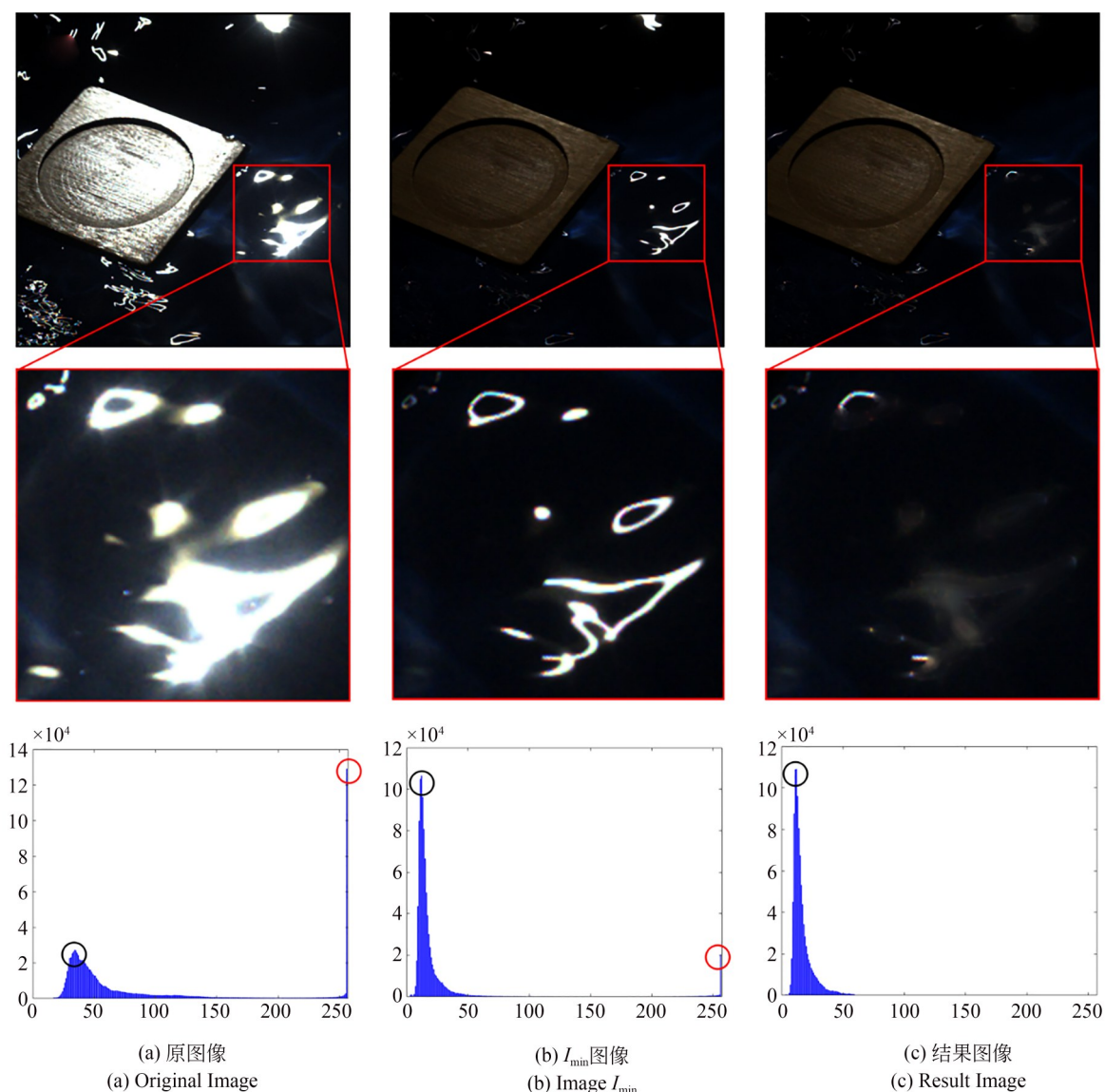


图 8 实验结果对比图

Fig. 8 Comparison of experimental results

耀光像素点居多,水面灰度信息偏离水辐射灰度等级。 $I_{\min}$ 图像中部分饱和耀光像素点得到有效抑制,但仍存在部分饱和像素,即偏振饱和耀光难以得到抑制。结果图像针对偏振饱和耀光区域,将非耀光水体的像素灰度特征通过FMM方法扩散到耀光区域,有效地抑制了偏振饱和耀光,基本消除了饱和像素点。

为了验证算法的有效性与可靠性,本文基于室内耀光模拟及偏振成像平台对水面不同漂浮物进行偏振成像。在保证文献[12],文献[11],文献[7]与本文实验条件相同的情况下,本文进行了实验验证。结合主客观评价指标,对耀光抑

制效果,图像质量评价等方面定性分析与文献[12]、文献[11]、文献[7]等的算法进行对比评价。

由图9可以看出,文献[12]、文献[11]、文献[7]等方法对原图耀光区域进行了有效地抑制,缩减了耀光区域的面积,减少了因耀光产生的饱和和噪声。

其中文献[12]方法整体亮度最自然,海面区域与目标水下部分的细节信息最为丰富。但该方法在分离反射光时由于水表目标区域折射率并不等同于水体折射率,容易造成分离时的误判,导致目标部分信息损失。文献[11]与文献

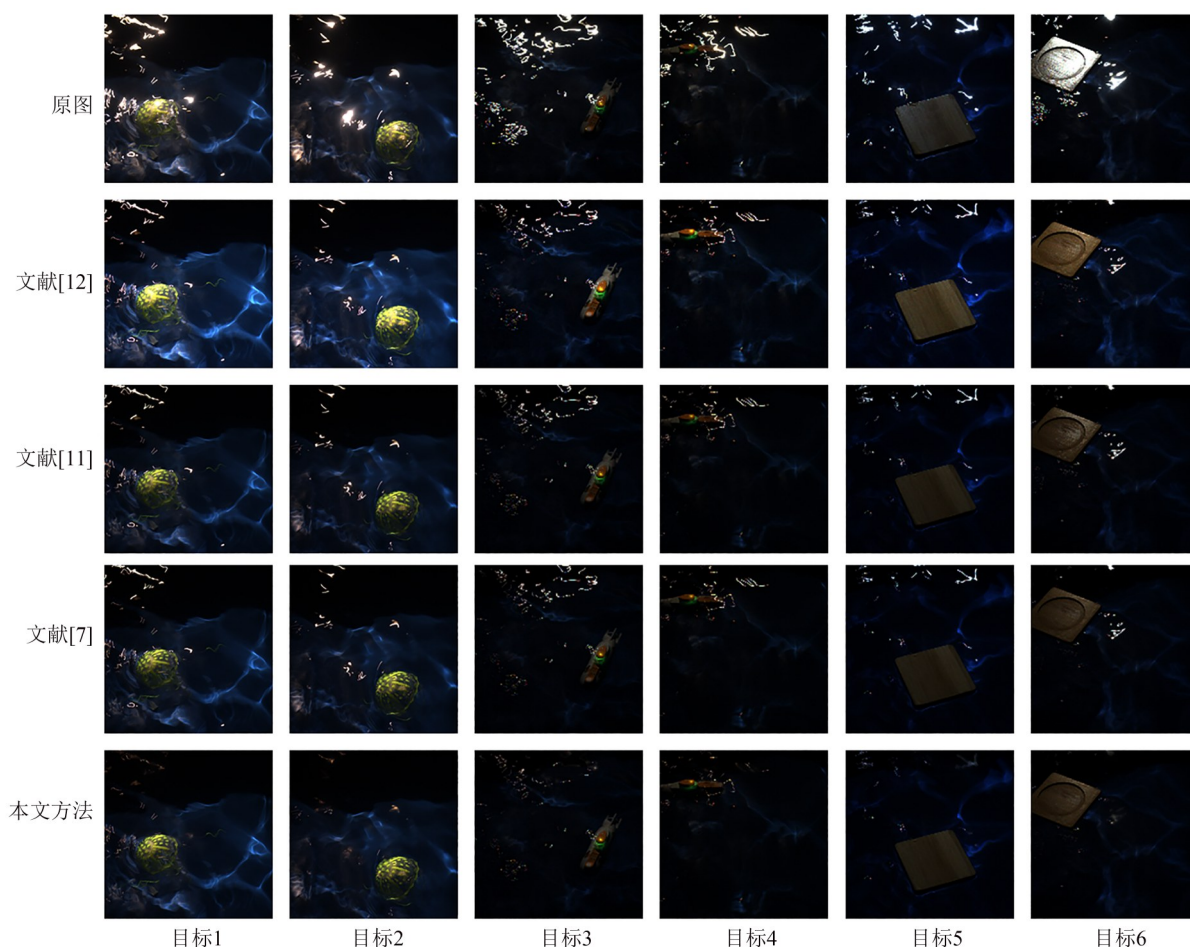


图9 算法结果对比图

Fig. 9 Comparison of algorithm results

[7]方法对目标高光区域的反演效果更为优秀,有效地恢复了目标原有的灰度信息。但是会导致图像整体的亮度损失,降低了目标有益反射光信息的整体占比。

值得注意的是,相较于上述文献是从偏振光学机理上对耀光进行抑制,虽然对那些偏振采集数据不严重失真区域抑制效果较好,但对于那些由于耀光导致的严重失真区域抑制表现不佳。本文将偏振耀光抑制技术与图像修复方法相结合,解决了残留的耀光问题,更加适用于因为耀光的高能辐射导致偏振探测器部分像元完全饱和的场景。

另外,根据文献[27]中风速对海面耀光影响的研究可知,不同风速下太阳耀光的平行与垂直分量的数值差距没有明显变化;因此,当风速增加时,耀光仍具有显著的偏振特性,通过解算 $I_{\min}$ 图像的方法仍可以进行初步的耀光抑制。同时

随着风速的增加,太阳耀光的表现形式将更为分散,本文针对小缺损区域的图像修复方法可以发挥更加良好的作用。

为了对耀光抑制效果进行定量评估,本文比较了耀光抑制前后饱和像素数、图像灰度均值以及信噪比的变化情况。饱和像素数是描述图像中耀光占比的重要指标,饱和像素数越少,说明耀光像素占比越小。图像灰度均值反映了耀光抑制前后图像能量的变化情况,灰度均值越小,说明图像整体能量越小,耀光抑制效果越明显,但过低的灰度均值在部分场景下意味着图像亮度较低,不利于目视观察。信噪比可以被用来描述目标信号和背景噪声之间的强度关系^[12],信噪比越大,说明背景噪声对目标的影响效果越小,目标显著性越高。另外,文献[12]不同于其他参考文献的抑制耀光方法,该方法旨在增强目标显著性和恢复成像质量,因此在饱和像素数与灰度均值的图像指标上

本文不将其作为对比方法,而选择在信噪比的指标中将该方法用于算法对比。

表 1 饱和像素数

Tab. 1 Number of saturated pixels

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
原图	17 042	11 955	18 275	9 226	9 915	35 445
文献[11]	2 846	1 998	1 966	756	1 500	1 306
文献[7]	2 766	1 950	1 883	695	1 457	1 261
本文方法	3	1	12	1	4	1

表 2 图像灰度均值

Tab. 2 Mean grayscale of images

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
原图	33. 16	28. 73	18. 56	12. 35	15. 50	25. 16
文献[11]	17. 62	14. 95	6. 97	5. 21	7. 51	7. 55
文献[7]	17. 23	14. 67	6. 52	4. 96	7. 29	6. 93
本文方法	16. 02	13. 92	5. 47	4. 48	6. 57	6. 45

从表 1~表 2 中数据中可以看出,本文方法对比原图像大幅减少了饱和像素点,同时图像的灰度均值有所降低。虽然在部分场景下出现了亮度偏暗的情况,但是图像中灰度值降低更多的是耀光背景,而非目标,因此目标的显著性有所提高。这一点可以通过表 3 信噪比指标中的数据进行验证。通过定量计算可知,本文方法对比原图像饱和像素数降低比例达到 99. 98%,图像灰度均值降低 59. 35%。相较于文献 [11]、文献[7] 等的方法,本文方法在饱和像素数的抑制上具有

更加显著的效果。而在图像灰度均值的对比上,本文方法与文献[11]、文献[7]等方法差距较小。相较于文献[7],本文算法结果图像饱和像素数降低 99. 78%,灰度均值降低 9. 11%。从表 3 中数据可以看出,本文方法与文献[12]方法在信噪比指标上差别较小且均显著优于原图像,小幅优于其他方法。这说明经本文算法抑制耀光后的图像中,背景噪声对目标的影响减小,验证了本文方法在抑制耀光的同时提高了目标的显著性。

表 3 信噪比

Tab. 3 Signal to noise ratio

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
原图	10. 588 1	—4. 590 9	—9. 973 6	0. 226 2	2. 425 1	—2. 282 3
文献[12]	15. 958 5	9. 262 1	9. 574 8	8. 526 4	17. 096 9	10. 847 3
文献[11]	13. 747 1	5. 185 5	7. 587 3	7. 731 1	13. 699 1	6. 965 5
文献[7]	14. 268 3	5. 670 5	8. 737 3	8. 482 7	16. 155 8	8. 323 3
本文方法	15. 969 3	13. 828 7	9. 337 9	8. 253 5	17. 644 8	12. 256 4

综上所述,通过本文方法抑制耀光后的图像在整体明暗程度上与其他偏振抑制方法差别较小,但在降低饱和像素数量以及信噪比指标的提高上普遍优于其他方法。针对数据失真的偏振饱和耀光区域,本文方法展现出了良好的抑制效

果。本文方法即结合了传统偏振抑制方法对耀光区域的场景反演效果,又克服了因偏振数据饱和而导致光学抑制方法失效的问题,有效地抑制了水面耀光。将本文方法与文献[12]、文献[11]、文献[7]等方法进行对比,从主观感受与客

观数据上表明了本文方法在水面目标探测时对耀光抑制的有效性。

4 结 论

针对传统偏振耀光抑制方法对部分饱和像素点抑制效果不佳的问题,本文提出了一种基于偏振特征区域分解的耀光抑制方法,该方法具有以下创新性与结论:

(1)本文通过分析偏振探测器对饱和耀光的采集情况,发现不同耀光像素点的偏振数据采集情况具有差异,部分耀光像素点的偏振数据采集与解算结果偏离真实场景反演。

(2)本文对耀光区域进行特征分解,基于耀光像素点灰度值在不同偏振角度下的变化情况,结合暗通道排除颜色信息,将耀光区域分解为偏振饱和耀光与偏振非饱和耀光。

(3)本文为偏振饱和耀光的处理提供了思路,将图像修复技术与偏振抑制方法相结合,利

用FMM图像修复方法对偏振信息解算不准确的像素点进行灰度重建。更加适用于复杂场景下的耀光抑制工作。

本文通过搭建室内耀光模拟及偏振采集平台对耀光偏振图像进行采集与处理,并与相关抑制耀光方法进行对比。实验结果表明:本文算法克服了传统偏振抑制方法对偏振饱和耀光区域失效的问题。相较于传统方法,本文方法对饱和像素占比的抑制更为明显。耀光抑制后,图像饱和像素数降低为个位,灰度均值得到一定降低,信噪比显著提升。相比于原图像,本文结果图像饱和像素数平均降低了99.98%,灰度均值降低了59.35%。同时与文献[7]方法相比,饱和像素数平均降低了99.78%,灰度均值降低了9.11%,验证了本文方法对耀光抑制的有效性。

但在部分场景下,本文结果图像中出现了亮度偏暗的问题。后续我们将尝试对文中的偏振耀光抑制方法进行针对性调整,并尝试优化图像修复算法以应对更复杂的耀光场景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] AVRAHAMY R, MILGROM B, ZOHAR M, *et al.* Improving object imaging with sea glinted background using polarization method: analysis and operator survey[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 8764-8774.
- [4] 韩平丽,刘飞,魏雅喆,等. 用于海面目标探测的中波红外实时偏振成像系统研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6): 746-752+760.
HAN P L, LIU F, WEI Y Z, *et al.* Real-time mid-infrared polarization imaging system design for marine targets detection[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 746-752+760. (in Chinese)
- [5] 晏磊,顾行发,褚君浩,等. 高分辨率定量遥感的偏振光效应与偏振遥感新领域[J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 901-916.
- [6] YAN L, GU X F, CHU J H, *et al.* Optical polarized effects for high-resolution quantitative remote sensing and new polarization remote sensing fields[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(6): 901-916. (in Chinese)
- [7] ZHU Z M, LI X F, ZHANG J, *et al.* Specular flare suppression method for reflective materials based on the optimal polarizing angle[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(27): 8034.
- [8] FOUGNIE B, FROUIN R, LECOMTE P, *et al.* Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(18): 3844-3856.
- [9] COOPER A W, LENTZ W J, WALKER P L. Infrared polarization ship images and contrast in the MAPTIP experiment[C]. *Image Propagation through the Atmosphere*. Denver, CO, USA. SPIE, 1996, 2828: 85-96.
- [10] 邓宇,付强,张肃,等. 基于偏振检测技术的海面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 2001003.
- [11] 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. (in Chinese)
- [10] 刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(5): 362-365.
- LIU Z G, ZHOU G H. Polarization of Sun glint [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 362-365. (in Chinese)
- [11] 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.
- 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. (in Chinese)
- [12] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于偏振特征的水面饱和耀光抑制技术[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2401009.
- ZHANG J H, ZHANG Y, SHI Z G, *et al.* Suppression technology for saturated water surface glint based on polarization characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2401009. (in Chinese)
- [13] 张聪立, 周俊焯, 纵园, 等. 基于偏振信息的海面太阳耀光抑制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(15): 2181-2192.
- ZHANG C L, ZHOU J Z, ZONG Y, *et al.* Sun glint suppression from sea surface based on polarization information[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(15): 2181-2192. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 黎海育, 李抄, 李校博, 等. 基于偏振相机的全斯托克斯偏振仪优化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0326001.
- LI H Y, LI C, LI X B, *et al.* Optimization of polarization-camera-based full stokes polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0326001. (in Chinese)
- [17] 安衷德, 段锦, 胡碧君, 等. 非球形介质的偏振激光传输特性实验研究[J]. 光散射学报, 2017, 29(4): 361-366.
- AN Z D, DUAN J, HU B J, *et al.* Experimental on the characteristics of polarized laser propagation in non-spherical media [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2017, 29(4): 361-366. (in Chinese)
- [18] 胡超, 吴骅, 屈磊, 等. 一种改进的快速步进图像修复算法[J]. 计算机技术与发展, 2007(5): 206-209.
- HU C, WU Y, QU L, *et al.* An image inpainting algorithm based on improved fast marching method [J]. *Computer Technology and Development*, 2007(5): 206-209. (in Chinese)
- [19] 张红英, 彭启琮. 数字图像修复技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(1): 1-10.
- ZHANG H Y, PENG Q C. A survey on digital image inpainting[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(1): 1-10. (in Chinese)
- [20] BERTALMIO M, SAPIRO G, CASELLES V, *et al.* Image inpainting [C]. *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '00. Not Known*. ACM, 2000: 417-424.
- [21] 闵溪青, 黄杰. 简化的快速图像修复方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(S1): 169-172.
- MIN X Q, HUANG J. Simplified fast image inpainting method[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(S1): 169-172. (in Chinese)
- [22] 郭霖, 肖创柏, 孙翹楚, 等. 一种改进的快速图像修复算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(5): 115-118.
- GUO B, XIAO C B, SUN Q C, *et al.* An improved fast image inpainting method [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(5): 115-118. (in Chinese)
- [23] 江涛, 李强, 陈苏宇, 等. 基于 Otsu 和 FMM 方法的风洞试验图像修复[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 123293.
- JIANG T, LI Q, CHEN S Y, *et al.* Image inpainting of wind tunnel test based on Otsu method and FMM [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*

- Sinica*, 2020, 41(2): 123293. (in Chinese)
- [24] 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. (in Chinese)
- [25] 赵永强,李宁,张鹏,等. 红外偏振感知与智能处理[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1102001.
- ZHAO Y Q, LIN N, ZHANG P, *et al.* Infrared polarization perception and intelligent processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1102001. (in Chinese)
- [26] 王佳林,段锦,付强,等. 基于 Mueller 矩阵的偏振抑制反光方法[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 3788/AOS230572.
- WANG J L, DUAN J, FU Q, *et al.* Polarization suppression reflection method based on mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(20): 3788/AOS230572. (in Chinese)
- [27] 霍彦利. 海面舰船对太阳亮带的散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- HUO Y L. *Study on the Scattering Characteristics of Ships on the Sea Surface to the Solar Bright Bands*[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)

作者简介:



段 锦(1971—),男,吉林长春人,博士,博士生导师,2004年于吉林大学获得博士学位,主要从事偏振成像探测、图像处理与模式识别、数字光学环境仿真研究。E-mail:duanjin@vip.sina.com



方瑞森(2000—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2022年于白城师范学院获得学士学位,主要从事偏振图像处理及偏振特性分析研究。E-mail:1601486356@qq.com