

文章编号 1004-924X(2023)15-2181-12

基于偏振信息的海面太阳耀光抑制

张聪立¹, 周俊焯^{1,2,3}, 纵 园^{1,2,3}, 郝 佳^{1,2,3}, 虞益挺^{1,2,3*}

(1. 西北工业大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315103;

2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;

3. 空天微纳系统教育部重点实验室, 陕西省微纳机电系统重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 太阳耀光干扰严重阻碍遥感领域中目标信息的有效提取, 为实现复杂海面背景中水下军事目标的全天候全天时监测, 针对无人机载平台, 提出基于偏振信息的海面太阳耀光抑制方法。利用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、选择非饱和偏振图像组解算场景全域偏振信息, 使用穆勒矩阵形式的太阳耀光归一化反射率求解太阳耀光的偏振态空间分布; 提出光源-水下目标-探测器偏振态传输模型以求解目标信息光偏振度, 并根据被动水下成像物理模型, 利用水体衰减系数对目标信息光偏振度进行修正; 最终实现波动水面的反射太阳耀光抑制。实验结果表明: 对于户外真实波动水面场景, 耀光抑制图像的区域对比度和图像信杂比相较于 90° 偏振图像分别提升 25.3% 和 78.4%。本文方法可有效增强太阳耀光干扰下的水下目标表征, 从而助力我国挺进深蓝、向海而兴。

关键词: 偏振成像; 海洋强国; 太阳耀光; 杂波抑制; 航空遥感

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233115.2181

Sun glint suppression from sea surface based on polarization information

ZHANG Congli¹, ZHOU Junzhuo^{1,2,3}, ZONG Yuan^{1,2,3}, HAO Jia^{1,2,3}, YU Yiting^{1,2,3*}

(1. Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315103, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace (Ministry of Education),

Key Laboratory of Micro and Nano-Electro-Mechanical Systems of Shaanxi Province,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

* Corresponding author, E-mail: yyt@nwpu.edu.cn

Abstract: Sun glint interference seriously hinders the effective acquisition of object information in the remote sensing field. In this paper, a sun glint suppression method based on polarization information for UAV-borne platform was presented to realize all-weather and all-time detection of underwater military targets in a complex marine background. A light component decoupling model was constructed using the polarization characteristic difference between sun glint and object information light and an unsaturated image set was selected to solve the global polarization information of the scene. Then, the spatial distribution of

收稿日期: 2023-01-05; 修订日期: 2023-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51975483); 陕西省重点研发计划资助项目 (No. 2020ZDLGY01-03); 宁波市自然科学基金资助项目 (No. 202003N4033)

sun glint polarization state was deduced based on the normalized reflectance of sun glint in a Muller matrix. Further, a source-submarine-detector polarization state transmission model was proposed to estimate the polarization degree of object information light; then, the water attenuation coefficient was used to correct the model according to the physics-based model for passive underwater imaging. Finally, a sun glint suppression method that is applicable to a wavy water surface was realized. The outdoor experimental results show that the region contrast and signal-to-noise ratio of sun glint suppression image are improved by 25.3% and 78.4%, respectively, compared with those of the 90° polarization image. Our method can effectively enhance the characteristics of submarine targets under the interference of sun glint, thus helping our country to better explore the sea.

Key words: polarization imaging; strong maritime country; sun glint; clutter suppression; aviation remote sensing

1 引言

我国是海洋资源大国,近年来随着海域边界军事冲突的加剧,加强对本国海域的监测力度是建设海洋强国、维护海洋权益的发展之要。然而,卫星遥感、航空遥感、地面监视等传统光强或光谱监测手段受太阳耀光的影响,难以满足海域动态监视监测的需要^[1-2]。在受太阳耀光影响的水体区域,利用光电传感器对蛙人、鱼雷、潜艇等水下目标进行监测和识别时,反射耀光辐射几乎淹没了目标辐射,致使水下目标的关键信息缺失,严重阻碍海域的动态监视监测,因此,太阳耀光干扰下水下目标的检测识别技术成为海洋国防领域的研究热点^[3-4]。

太阳耀光是直射太阳光经海面镜面反射进入传感器形成的强辐射信号,是造成传感器饱和失真的重要原因。Hochberg 等^[5]报道在美国国家航空航天局购买的 45 张 IKONOS 高分辨率卫星影像中,有 9 张被太阳耀光严重污染,有 13 张存在明显的耀光区域。为避免太阳耀光污染遥感影像,SeaWiFS 水色遥感器具有使传感器偏离天顶方向 20° 的侧摆功能;不具备侧摆功能的遥感器则通过后期处理算法剔除太阳耀光^[6],例如 NASA 的标准水色处理算法基于风向无关的 Cox-Munk 海面微面元法线概率统计模型对耀光区域创建掩膜,AVIRIS 遥感卫星基于近红外波段海面离水辐射近零的假设估算影像中太阳耀光强度并对其进行去除。然而,使传感器侧摆的策略仍无法避免影像中大量耀光区域的产生;对耀光区域创建掩膜的方法会导致部分研究数据

丢失,且由于光学遥感的尺度效应,Cox-Munk 模型难以应用于高空间分辨率图像^[7-8];而近红外波段离水辐射近零的假设对于浅水或植被丰富的水域是不准确的,存在局限性。近年来,基于偏振信息的水面耀光抑制方法因无需变换相机姿态,不用剔除捕获数据和不依赖前提假设等优势,而受到广大研究者的青睐。

由于水体的光学特性和人造目标的光学特性不同^[9],水面反射太阳耀光与水下透射目标信息光存在明显的偏振特性差异,因此,利用偏振信息可实现太阳耀光和目标信息光的解耦分离。根据菲涅尔公式,水面的垂直方向反射比大于平行方向反射比,因此,传统方式是在探测器前安装单个平行线偏振片以抑制耀光的垂直偏振分量。然而,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^[10]。2016 年,Zhao 等^[11]搭建基于双旋转偏振片的中波红外(3.7~4.8 μm)偏振成像系统,根据 Cox-Munk 模型推导太阳耀光的反射率空间分布,结合探测器的感光像元积分公式和大气辐射传输算法求解出双线偏振片探测最优夹角,从而提升目标与背景的对比度。2019 年,Liang 等^[12]根据太阳耀光的时变闪烁特性提出基于偏振的海面杂波抑制方法,对每个偏振通道的时序图像逐像素点取最小值构成初始杂波抑制图像集合,再对不同偏振通道的初始杂波抑制图像逐像素点取最小值构成最终杂波抑制图像。然而,上述研究均未考虑目标反射光偏振传输的物理本质,并且成像目标局限于浮水物

体。此外,直接偏振滤光法存在场景辐射能量减弱的劣势。2022年,张景华等^[13]根据观测几何估计太阳耀光和水下目标信息光的偏振度,针对垂直方向光强图像的饱和失真问题,提出基于完全偏振分解的光强图像恢复方法,建立太阳耀光和水下目标信息光的解耦分离物理模型,获得比图像融合、图像修复、图像滤波等仅基于图像特征的太阳耀光抑制算法^[14-15]更优的效果。

尽管基于偏振信息的太阳耀光抑制方法目前已取得初步成效,关于太阳耀光干扰下水下军事目标识别探测的研究却很少。现有的太阳耀光抑制物理模型基于平静水面假设,与不同风向、风速等因素影响下的实际海面状态有所不同。传统方法通常假设无偏水下目标反射光离水起偏后进入探测器,但研究表明^[16-17]:水下目标信息光在离水前也存在偏振特性,尤其是在浅水区域。针对上述不足,本文利用水面反射太阳耀光和水下目标信息光的偏振特性差异提出基于物理模型的太阳耀光抑制算法;基于海面耀光归一化反射穆勒矩阵获取反射太阳耀光的偏振态空间分布;针对浅水区域水下目标建立光源-水下目标-探测器偏振态传输模型,基于被动水下成像物理模型引入水下偏振度修正因子,从而确定目标反射光偏振态。户外场景实验有力证明了本文方法抑制水面太阳耀光的有效性,从而助力我国海洋强国建设和海洋权益维护。

2 原 理

2.1 相机探测信号光的组成及分解

基于无人机载平台的光学遥感对海面进行成像时,接收到的光学信号包含瑞利散射、气溶胶散射、海面反射太阳耀光、离水辐射和水下目标光等信号。晴朗无云天气下的低空遥感(< 100 m)通常不考虑瑞利散射、气溶胶散射等大气散射项^[18-19];离水辐射是太阳光与水体物质相互作用并后向散射离开水面形成的^[20],主要用于计算水体叶绿素、无机悬浮物和有机黄色物质的分布信息,并非本文主要考虑的对象;水下目标信息光是太阳直射光折射穿过水面,在水次表面向下传输过程中受到水下目标反射,反射光向上经水面折射后形成的。

无人机搭载光学遥感进行水下目标侦测

时,主要考虑水下目标信息光 I_T ,和波动海面镜反射太阳直射光形成的太阳耀光 I_R ,如图1所示。 I_T 和 I_R 为两个相互独立的光强分量,单独从强度维度难以实现两种光成分的解耦分离;而海面反射太阳耀光和水下透射目标信息光的偏振态存在较大差异,因此偏振信息可作为光成分解耦的另一个维度。

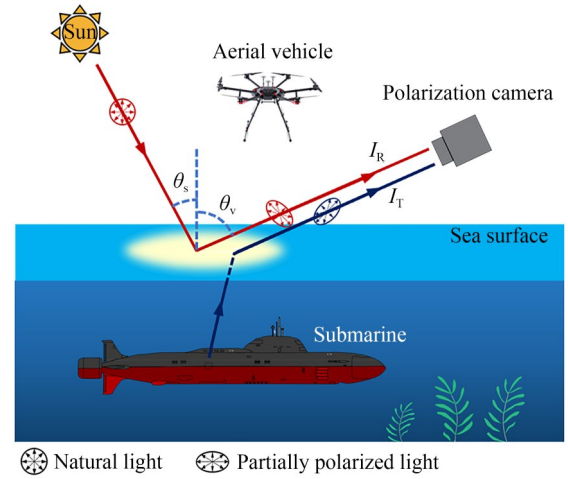


图1 相机探测光信号的组成

Fig. 1 Components of optical signal captured by polarization camera

光强相机前放置任意角度旋转的线偏振镜,在旋转线偏振镜的过程中可得最大光强图像 $I_{\max}$ 和最小光强图像 $I_{\min}$ 。假设目标信息光和太阳耀光具有一致的偏振方向,则 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 可分解为:

$$\begin{aligned} I_{\max}(i, j) &= I_T^{\max}(i, j) + I_R^{\max}(i, j) \\ I_{\min}(i, j) &= I_T^{\min}(i, j) + I_R^{\min}(i, j) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $I_T^{\max}$ 和 $I_T^{\min}$ 分别为目标信息光的最大光强图像和最小光强图像; $I_R^{\max}$ 和 $I_R^{\min}$ 分别为太阳耀光的最大光强图像和最小光强图像; (i, j) 表示像素点的坐标位置。

目标信息光和太阳耀光均为部分偏振光,设目标信息光的偏振度为 ρ_T ,太阳耀光的偏振度为 ρ_R ,根据偏振度的定义有:

$$\begin{aligned} \rho_T(i, j) &= \frac{I_T^{\max}(i, j) - I_T^{\min}(i, j)}{I_T^{\max}(i, j) + I_T^{\min}(i, j)} \\ \rho_R(i, j) &= \frac{I_R^{\max}(i, j) - I_R^{\min}(i, j)}{I_R^{\max}(i, j) + I_R^{\min}(i, j)} \end{aligned} \quad (2)$$

结合式(1)和式(2),可从最大和最小光强图像中解耦得到目标信息光强度 I_T 和太阳耀光强度 I_R :

$$I_T(i, j) = I_T^{\max}(i, j) + I_T^{\min}(i, j) = \frac{(1 + \rho_R(i, j)) \cdot I_{\min}(i, j) - (1 - \rho_R(i, j)) \cdot I_{\max}(i, j)}{\rho_R(i, j) - \rho_T(i, j)} \quad (3)$$

$$I_R(i, j) = I_R^{\max}(i, j) + I_R^{\min}(i, j) = \frac{(1 - \rho_T(i, j)) \cdot I_{\max}(i, j) - (1 + \rho_T(i, j)) \cdot I_{\min}(i, j)}{\rho_R(i, j) - \rho_T(i, j)}$$

由式(3)可知,目标信息光 I_T 与太阳耀光偏振度 ρ_R 和目标信息光偏振度 ρ_T 有关:由于 ρ_T 处于分母位置,因此 ρ_T 影响分离后 I_T 的强度;而 ρ_R 既处于分母位置,又与分子位置的最大光强图像 $I_{\max}$ 和最小光强图像 $I_{\min}$ 相关,因此 ρ_R 不仅影响 I_T 的强度,并且直接决定消除耀光后透射图像的局部纹理和细节特征。

2.2 最大光强图像和最小光强图像的求解

不同偏振方向光强与斯托克斯参量之间的关系为:

$$I_k = \frac{1}{2} \cdot S_0 + \frac{1}{2} \cdot S_1 \cdot \cos 2\phi_k + \frac{1}{2} \cdot S_2 \cdot \sin 2\phi_k, \quad (4)$$

式中: I_k 为 k 索引对应偏振方向的光强; S_0, S_1, S_2 为线偏振斯托克斯参量; ϕ_k 为 k 索引对应的偏振方向。为求解线偏振斯托克斯参量,至少需要捕获3幅不同偏振角度对应的偏振图像。

太阳耀光海面背景下,垂直偏振方向及其邻近方向光强图像存在大量饱和像元^[10-11],阻碍场景斯托克斯参量的有效解算,因此需要选择若干幅非饱和偏振图像恢复场景偏振信息:

$$\begin{bmatrix} I_{k_1} \\ I_{k_2} \\ I_{k_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \cos 2\phi_{k_1} & 0.5 \sin 2\phi_{k_1} \\ 0.5 & 0.5 \cos 2\phi_{k_2} & 0.5 \sin 2\phi_{k_2} \\ 0.5 & 0.5 \cos 2\phi_{k_3} & 0.5 \sin 2\phi_{k_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: k_1, k_2, k_3 分别为3幅非饱和偏振图像对应的索引。

求解式(5),得到 S_0, S_1, S_2 的值,进而解算出最大光强图像 $I_{\max}$ 和最小光强图像 $I_{\min}$:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} \cdot S_0 + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} \cdot S_0 - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \quad (6)$$

2.3 太阳耀光偏振度的求解

水面对太阳光在垂直和平行于入射主平面方向的反射比不同,因此无偏太阳光经水面反射后起偏。若已知两方向反射比,可得反射光偏振度为:

$$\rho_R = \frac{r_s^2 - r_p^2}{r_s^2 + r_p^2}, \quad (7)$$

式中: r_s, r_p 分别为垂直、平行方向的菲涅尔反射

系数。根据非磁性物质的菲涅尔公式:

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad (8)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

式中: n_1, n_2 分别为入射、透射介质的折射率; θ_1 为入射角, θ_2 为折射角。已知 θ_1, n_1, n_2 ,结合斯涅尔定律即可求得水面反射太阳耀光的偏振度。

然而,受海洋潮汐、海流、海浪、湍流等海洋水体动力因素的影响,实际海面呈波浪状,不可直接应用菲涅尔公式计算波动海面的太阳耀光偏振度。1954年,Cox & Munk^[21]提出波动海面可以用一组法线方向服从高斯分布的、遵循菲涅尔反射定律的镜像微面元近似,并根据海面某点处特定斜率发生的频率解释该点附近的海面平均亮度。不考虑风向因素,忽略Gram-Charlier展开式的Cox-Munk模型为^[22]:

$$P(\theta_v, \theta_s, \varphi, \sigma^2) = \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{\sigma^2}\right), \quad (9)$$

式中: P 为海面倾斜坡面的概率统计函数; θ_v 为观测天顶角, θ_s 为光源天顶角; φ 为光源-观测相对方位角; β 为微面元法向量与天顶方向夹角; σ^2 为表面粗糙度,不考虑风向因素的情况下,海水的表面粗糙度为 $\sigma^2 = 0.003 + 0.00512v$, v 表示风速。光源-观测几何模型及参量如图2所示, ω 为

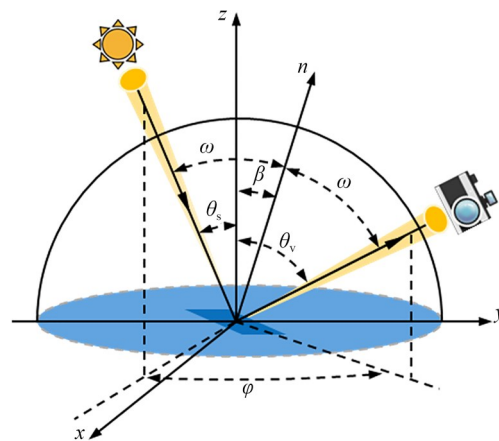


图2 光源-观测几何模型

Fig. 2 Source-viewing geometric model

微面元入射角。

利用倾斜坡面概率统计函数可以得到海面耀光的归一化反射率 $L_{GN}^{[23]}$:

$$L_{GN} = \frac{R(\omega)}{4\cos\theta_v \cos^4\beta} P(\theta_v, \theta_s, \varphi, \sigma^2), \quad (10)$$

式中 $R(\omega)$ 为观测点反射率。将 $R(\omega)$ 替换为反

$$R(\omega) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s^2(\omega) + r_p^2(\omega) & r_s^2(\omega) - r_p^2(\omega) \\ r_s^2(\omega) - r_p^2(\omega) & r_s^2(\omega) + r_p^2(\omega) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中: δ 为垂直偏振分量和水平偏振分量的相位差。

根据球面余弦定理,求得几何参量之间的数学关系为:

$$\cos 2\omega = \cos\theta_s \cos\theta_v + \sin\theta_s \sin\theta_v \cos\varphi, \quad (13)$$

$$S_{out} = L_{GN} \cdot S_{in} = \frac{P(\theta_v, \theta_s, \varphi, \sigma^2)}{8\cos\theta_v \cos^4\beta} \begin{bmatrix} r_s^2 + r_p^2 & r_s^2 - r_p^2 & 0 & 0 \\ r_s^2 - r_p^2 & r_s^2 + r_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2r_s r_p \cos\delta & 2r_s r_p \sin\delta \\ 0 & 0 & -2r_s r_p \sin\delta & 2r_s r_p \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

太阳耀光偏振度为:

$$\rho_R = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = \frac{r_s^2 - r_p^2}{r_s^2 + r_p^2}. \quad (16)$$

可见,虽然海水动力因素会改变海面粗糙度,但它对各斯托克斯参量造成的影响是同比例的,因此不会影响海面反射太阳耀光偏振度的空间分布。

2.4 目标透射光偏振度的求解

现有算法通常假定无偏水下目标信息光经水面起偏后进入相机,这种假设在目标信息光经水体介质悬浮粒子的多次吸收和散射后比较准确。但在浅水区域,无偏太阳光经水面起偏并折射进入水体,具有较强的偏振特性,且偏振光在散射介质中具有一定的偏偏性^[24],因此浅水区域可以等效为主动偏振光源照明水下目标的情景,目标反射光的偏振特性不可忽略,现有算法存在局限性。

为分析目标透射光的偏振度,可将浅水区域水下目标信息光的偏振传输分为3个阶段:(1)无偏太阳光经水面起偏后折射进入水体;(2)折射偏振光被目标表面反射后改变偏振特性;(3)反射偏振光经水-气界面二次折射后进入相机。偏振传输过程和相关几何参量如图3所示。

射穆勒矩阵 $R(\omega)$,即可得到海面耀光的归一化反射穆勒矩阵:

$$L_{GN} = \frac{R(\omega)}{4\cos\theta_v \cos^4\beta} P(\theta_v, \theta_s, \varphi, \sigma^2). \quad (11)$$

根据偏振光学理论,两层均匀介质的穆勒矩阵 $R(\omega)$ 为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2r_s(\omega)r_p(\omega)\cos\delta & 2r_s(\omega)r_p(\omega)\sin\delta \\ -2r_s(\omega)r_p(\omega)\sin\delta & 2r_s(\omega)r_p(\omega)\cos\delta \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\tan^2\beta = \frac{\sin^2\theta_s + \sin^2\theta_v + 2\sin\theta_s \sin\theta_v \cos\varphi}{(\cos\theta_s + \cos\theta_v)^2}. \quad (14)$$

结合式(9)~式(14),得到水面反射太阳耀

光的斯托克斯矢量为:

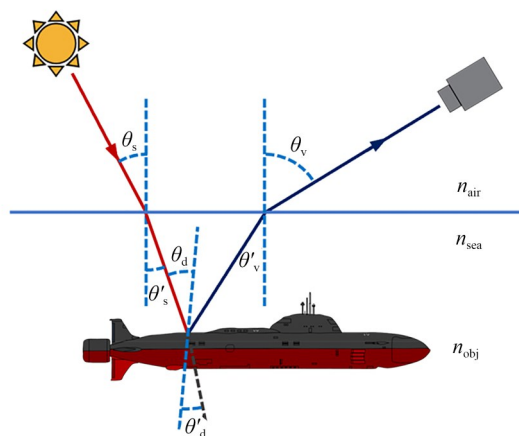


图3 浅水区域光源-水下目标-探测器偏振态传输模型

Fig. 3 Source-object-detector polarization transmission model in shallow sea region

根据水下目标信息光传输的3个阶段,利用菲涅尔公式计算各阶段的折射系数或反射系数,得到:

$$t'_p = \frac{2n_{air} \cos\theta_s}{n_{sea} \cos\theta_s + n_{air} \cos\theta'_s}, \quad (17)$$

$$t'_s = \frac{2n_{air} \cos\theta_s}{n_{air} \cos\theta_s + n_{sea} \cos\theta'_s}$$

$$r_p'' = \frac{n_{\text{obj}} \cos \theta_d - n_{\text{sea}} \cos \theta_d'}{n_{\text{obj}} \cos \theta_d + n_{\text{sea}} \cos \theta_d'}, \quad (18)$$

$$r_s'' = \frac{n_{\text{sea}} \cos \theta_d - n_{\text{obj}} \cos \theta_d'}{n_{\text{sea}} \cos \theta_d + n_{\text{obj}} \cos \theta_d'},$$

$$t_p''' = \frac{2n_{\text{sea}} \cos \theta_v'}{n_{\text{air}} \cos \theta_v' + n_{\text{sea}} \cos \theta_v}, \quad (19)$$

$$t_s''' = \frac{2n_{\text{sea}} \cos \theta_v'}{n_{\text{sea}} \cos \theta_v' + n_{\text{air}} \cos \theta_v}$$

式中: t_p' 和 t_s' 分别为太阳光从空气进入水体的水平方向折射系数和垂直方向折射系数; r_p'' 和 r_s'' 分别为水面折射光被水下目标反射的水平方向折射系数和垂直方向折射系数; t_p''' 和 t_s''' 分别为目标反射光从水体进入空气的水平方向折射系数和垂直方向折射系数; n_{air} , n_{sea} , n_{obj} 分别为空气、水体

和目标的折射率; θ_s 和 θ_s' 分别为太阳光从空气进入水体的入射角和折射角; θ_d 和 θ_d' 分别为水面折射光被水下目标表面反射的入射角和折射角; θ_v' 和 θ_v 分别为目标反射光从水体进入空气的入射角和折射角。根据斯涅尔定律可得:

$$\begin{aligned} n_{\text{air}} \cdot \sin \theta_s &= n_{\text{sea}} \cdot \sin \theta_s' \\ n_{\text{sea}} \cdot \sin \theta_d &= n_{\text{obj}} \cdot \sin \theta_d' \\ n_{\text{air}} \cdot \sin \theta_v &= n_{\text{sea}} \cdot \sin \theta_v' \end{aligned} \quad (20)$$

其中: θ_d , θ_v' 和 θ_s' 之间的平面几何关系为:

$$2\theta_d = \theta_v' + \theta_s'. \quad (21)$$

由此解得各阶段偏振相关的菲涅尔折射系数和反射系数。本文用穆勒矩阵描述 3 个阶段的偏振传输关系, 透射光的穆勒矩阵 M_t 和反射光的穆勒矩阵 M_r 分别^[25]为:

$$M_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2}{[\sin b \cos a]^2} \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 a + 1 & \cos^2 a - 1 & 0 & 0 \\ \cos^2 a - 1 & \cos^2 a + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\cos a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\cos a \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$M_r = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\tan a}{\sin b} \right]^2 \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 a + \cos^2 b & \cos^2 a - \cos^2 b & 0 & 0 \\ \cos^2 a - \cos^2 b & \cos^2 a + \cos^2 b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\cos a \cos b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\cos a \cos b \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中: θ_1 为入射角, θ_2 为折射角; $a = \theta_1 - \theta_2$, $b = \theta_1 + \theta_2$ 。

将 (θ_s, θ_s') 代入式 (22) 得到 M_t' , (θ_d, θ_d') 代入式 (23) 得到 M_r'' , (θ_v', θ_v) 代入式 (22) 得到 M_t''' , 由此得到出射光的斯托克斯矢量 S_{out} 为:

$$S_{\text{out}} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = M_t''' \cdot M_r'' \cdot M_t' \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

则未修正的水下目标信息光偏振度 ρ_T' 为:

$$\rho_T' = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (25)$$

2.5 目标透射光偏振度的修正

偏振光在实际水体的传输过程中, 受水体和水体粒子的吸收、散射等影响, 其偏振特性会在一定程度上衰减。因此, 需要对式 (25) 得到的透射目标信息光偏振度进行修正。

根据以色列理工学院 Schechner 等^[16]提出的被动水下成像物理模型, 探测器接收到的光强信号 I_{total} 主要包含场景的目标信息光 S 和后向散射

光 B , 即:

$$I_{\text{total}} = S(z) + B(z) = L_{\text{object}}^{\text{effective}} \cdot e^{-cz} + B_{\infty} \cdot (1 - e^{-cz}), \quad (26)$$

式中: $L_{\text{object}}^{\text{effective}}$ 为不受水体及水体粒子散射和吸收作用时探测器能接收到的有效目标信号; z 为光信号在水下传输的距离; B_{∞} 为无穷远处传来的后向散射光; c 为水体衰减系数, 表示光传输 1 m 距离后光能量衰减的自然对数值。实际上, 目标信号光不仅包含水下目标受水体吸收前的直接辐射光强, 还包含直接辐射光向前传播时与水体散射介质相互作用而产生的前向散射光。但由于前向散射光在近距离成像时对图像质量的影响比较小且作用机理较为复杂^[26], 因此本文忽略前向散射光的影响。

从 2.4 节的分析中可知, 水下目标反射光为部分偏振光, 在未经水体粒子吸收和散射时, 其偏振度 ρ_D 为:

$$\rho_D = \frac{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}}}{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} + L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}}, \quad (27)$$

式中: $L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}}$ 为 $L_{\text{object}}^{\text{effective}}$ 的偏振部分, $L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}$ 为 $L_{\text{object}}^{\text{effective}}$ 的非偏振部分。在受水体粒子吸收和散射作用后,水下目标反射光偏振度变为:

$$\rho_D' = \frac{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} \cdot e^{-cz}}{(L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} + L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}) \cdot e^{-cz} + B_{\infty} \cdot (1 - e^{-cz})}. \quad (28)$$

则可得水下偏振度修正因子 χ 为:

$$\chi(z) = \frac{\rho_D'}{\rho_D} = \frac{\frac{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} \cdot e^{-cz}}{(L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} + L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}) \cdot e^{-cz} + B_{\infty} \cdot (1 - e^{-cz})}}{\frac{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}}}{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} + L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}}} = \frac{1}{1 + \frac{B_{\infty}}{L_{\text{object, pol}}^{\text{effective}} + L_{\text{object, un}}^{\text{effective}}} \cdot \left(\frac{1}{e^{-cz}} - 1 \right)}. \quad (29)$$

由式(29)可知,仅需知道无穷远处后向散射光强度和有效目标辐射光强度的比值 $B_{\infty}/L_{\text{object}}^{\text{effective}}$, 水体衰减系数 c , 以及光波在水中传输的距离 z , 即可求得水下偏振度修正因子 χ 。在水域条件和光照环境稳定的情况下, $B_{\infty}/L_{\text{object}}^{\text{effective}}$ 为定值; 在无人机载水下军事目标探测中, z 值近似于潜海目标在水下的深度。

结合式(25)和式(29), 得到修正后的透射目标信息光偏振度为:

$$\rho_T = \rho_T' \cdot \chi^2. \quad (30)$$

综上所述, 将偏振相机采集的多幅非饱和偏

振图像代入式(5)、式(6)可求得最小强度图像 $I_{\min}$ 和最大强度图像 $I_{\max}$; 根据波动海面归一化耀光反射穆勒矩阵模型, 将太阳天顶角 θ_s 、观测天顶角 θ_v 代入式(8)和式(16), 可求得太阳耀光偏振度 ρ_R ; 根据光源-水下目标-探测器偏振传输模型, 将太阳天顶角 θ_s 、观测天顶角 θ_v 和水下目标折射率 n_{obj} 代入式(17)~式(25), 并通过式(29)得到的水下退偏因子修正, 可求得透射目标光偏振度 ρ_T ; 将 $I_{\min}$, $I_{\max}$, ρ_R , ρ_T 代入式(3), 得到太阳耀光反射图像 I_R 和水下目标透射图像 I_T , 实现海面太阳耀光抑制, 算法流程如图4所示。

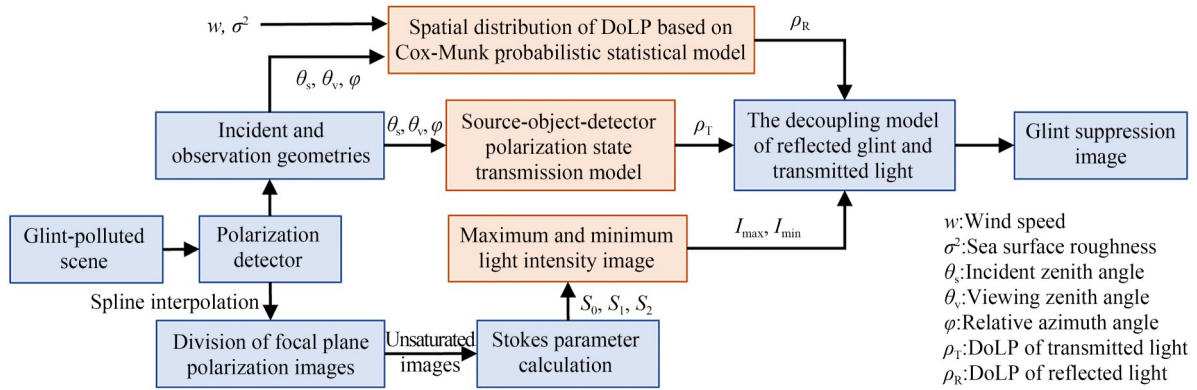


图4 海面太阳耀光抑制算法流程

Fig. 4 Flow chart of sun glint suppression algorithm on sea surface

3 户外场景实验和图像质量评价

3.1 户外场景实验

无人机载光学遥感器对水下军事目标进行探测时,易遭受强烈的海面反射太阳耀光,导致大面积传感器像元饱和,从而丢失水下军事目标特征信息。为模拟此场景,本文对天光照明环境下户外场景水下遥控潜艇进行偏振成像,并利用

太阳耀光抑制算法进行图像处理,对强度图像和耀光抑制图像进行直观感受和量化对比。

数据采集时间为2022年12月6日,15时15分;地点北纬29°52′43″,东经121°39′47″;天气情况多云转晴;环境温度为12℃,北风1级;潜艇尺寸为350 mm(长)×50 mm(宽);拍摄距离为3 m。实验场景如图5所示,分焦平面偏振相机采集偏振图像(型号:FLIR BFS-PGE-51S5P-

C), 内置 Sony IMX250MZR 单色偏振传感器, 波段为 400~900 nm。

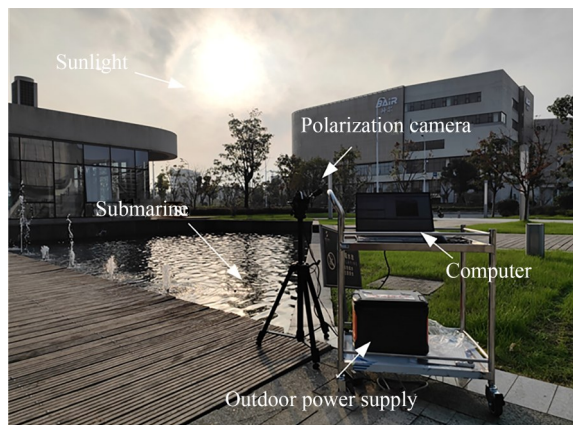


图 5 户外实验场景

Fig. 5 Scene of outdoor experiments

使用偏振相机采集分焦平面偏振图像, 并插值重构出 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的偏振图像, 由于 0° 偏振方向接近垂直偏振方向, 容易导致像元饱和失真, 因此仅将 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 偏振图像代入式 (5), 解算出斯托克斯参量图像 S_0, S_1, S_2 , 进而由式 (6)

求得最大光强图像 $I_{\max}$ 和最小光强图像 $I_{\min}$ 。当天日出时间为 6:36, 日落时间为 16:54, 因此太阳天顶角约为 64.89° , 在太阳入射主平面内放置相机, 即相对方位角 φ 为 180° , 调整相机观测天顶角为 55° , 可得太阳耀光的偏振度 ρ_R 为 0.927 5。水体折射率 n_{sea} 为 1.33, 潜艇模型材质为 ABS 塑料, 其可见光波段的平均折射率 n_{obj} 为 1.57^[27], 计算得未修正的潜艇信息光偏振度 ρ'_T 为 0.815 6。参考浅水湖泊的吸收与散射系数^[28], 小风速条件下可见光波段的水体衰减系数 $c \approx 3.20 \text{ m}^{-1}$; 估计 $B_\infty/L_{\text{object}}^{\text{effective}} \approx 0.25$, $z \approx 0.10 \text{ m}$, 可得水下偏振度修正因子 χ 为 0.913 8, 故修正后的信息光偏振度 ρ_T 为 0.681 1。考虑到本文模型仅适用于处理被太阳耀光遮掩的水体表面, 因此对强度图像过曝部分创建耀光掩膜; 耀光掩膜区域应用本文第 2 节所述的算法流程进行处理; 非耀光掩膜区域保留最小光强图像 $I_{\min}$ 中对应的像素点; 对融合图像采用对比度受限的自适应直方图均衡化方法。

户外波动水面太阳耀光遮掩下的水下潜艇场景如图 6 所示。图 6(a) 为强度图像及其直方图和累积百分比, 可见其强度图像的饱和像素点

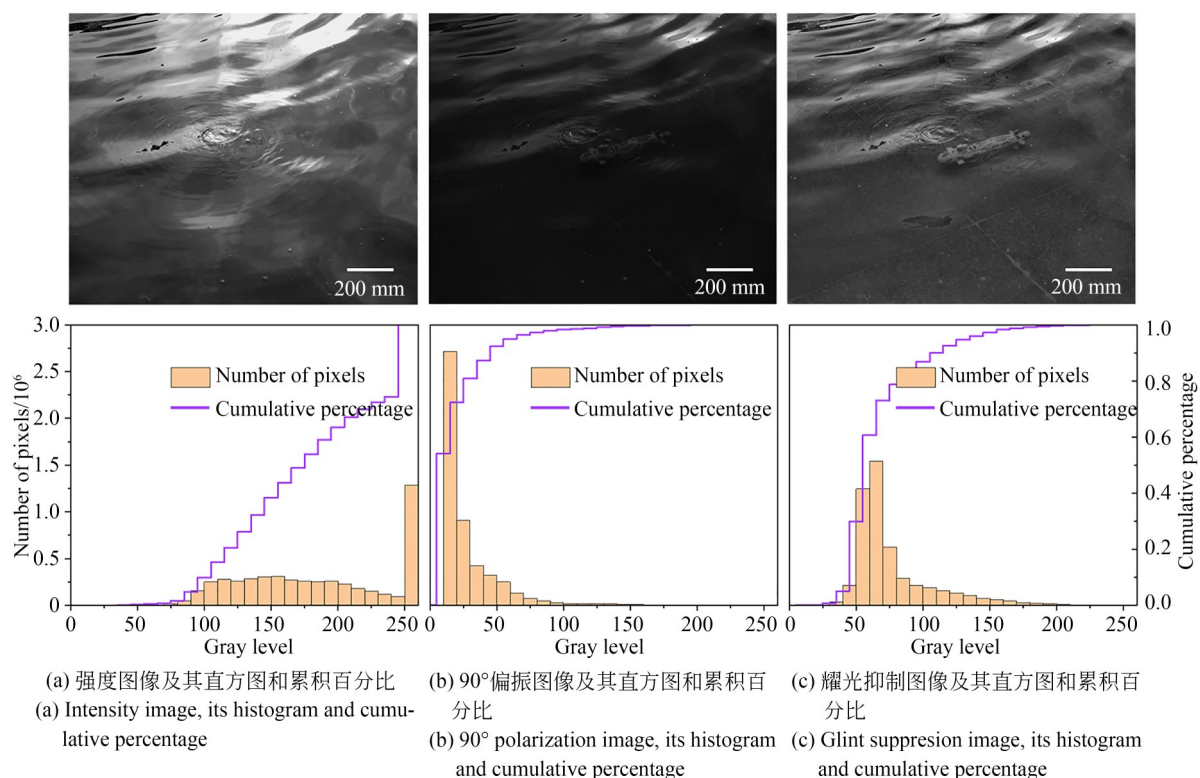


图 6 户外波动水面太阳耀光遮掩水下潜艇场景

Fig. 6 Outdoor scenes of submarine under glint-contaminated waves

占比达到 26%,遥控潜艇完全被太阳耀光覆盖;图 6(b)为 90°偏振图像及其直方图和累积百分比,尽管偏振滤光方式可消除场景中大部分区域的太阳耀光,仍难以识别检测水下遥控潜艇目标,其中 80% 的图像像素灰度值小于 30;图 6(c)为耀光抑制图像及其直方图和累积百分比,可见耀光抑制图像能显著消除水面耀光,并克服偏振滤光模式固有的场景辐射能量损失难题,有效增强目标纹理特征和区域细节信息。

3.2 图像质量评价

为定量评估太阳耀光抑制算法的有效性,采用区域对比度和图像信噪比指标对图像质量进行评价。区域对比度 C 描述图像目标区域和耀光区域像素平均值的对比程度,图像信噪比 R 衡量图像中目标信号与背景噪声之间的强度关系,其大小与目标的显著性水平呈正相关关系,即:

$$C = \left| 10 \times \log_{10} \frac{\mu_T}{\mu_G} \right|, \quad (31)$$

$$R = 10 \times \log_{10} \frac{|\mu_T - \mu_G|}{\sigma_G},$$

式中: μ_T 为目标区域的平均像素值; μ_G 为耀光区域的平均像素值; σ_G 为耀光区域的像素值标准差。室内平静水面场景、室内波动水面场景和户外波动水面场景下选取的目标区域和耀光区域如图 7 所示。

户外场景图像的区域对比度和图像信噪比如表 1 所示。对于户外真实波动水面场景,耀光抑制图像的区域对比度相较于强度图像和 90°偏

振图像分别提升 1 100.7% 和 25.3%,图像信噪比相较 90°偏振图像提升 78.4%。需要注意的是,户外真实场景强度图像的信噪比为负数,说明该图像信号强度弱于杂波强度。

表 1 户外场景图像的区域对比度和图像信噪比

Tab. 1 Region contrast and image SNR of outdoor real scene (dB)

Image	C	R
Intensity	0.176 5	-2.785 7
Polarimetric	1.691 2	4.357 9
Glnt suppression	2.119 3	7.776 7

由实验结果可知,本文提出的耀光抑制算法相较于强度成像和偏振滤光等直接成像方式具有更好的耀光抑制特性。然而,抑制图像中仍残留部分耀光像素,这是由于太阳耀光偏振度和水下目标信息光偏振度均是空域变化量,如图 8(a)所示,与算法中两者偏振度全局一致的假定存在偏差,因此无法消除理论预测偏振度与实际偏振度偏差较大的像素点耀光。此外,实际实验天气状况为多云转晴,无法忽略具有偏振特性的大气散射光,难以满足第 2 节太阳耀光抑制模型中光源无偏假定的理想情况。

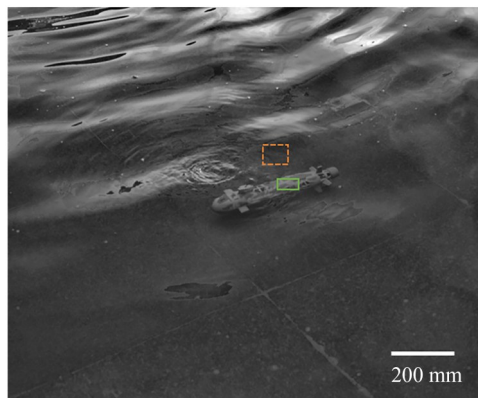
在物理模型推导过程中,假定水下目标信息光和太阳耀光的偏振方位一致,从户外场景的偏振角图 8(b)中可以看出,该假定基本符合实际情况。



(a) 线偏振度
(a) DoLP

(b) 线偏振角
(b) AoLP

图 8 户外波动水面场景的线偏振度和线偏振角图像
Fig. 8 DoLP and AoLP images of outdoor scenes of submarine under glint-contaminated wavy water surface



Object region Glint region

图 7 目标区域和耀光区域的选取

Fig. 7 Selection of object region and glint region

4 结 论

为解决传统机载遥感探测方式因受太阳耀

光干扰而丢失水下目标关键信息的难题,本文根据水面反射太阳耀光和透射目标信息光的偏振传输特性建立太阳耀光抑制物理模型,选取非饱和偏振图像解算最大和最小光强图像,基于穆勒矩阵形式的太阳耀光归一化反射率求解耀光的偏振态空间分布,提出光源-水下目标-探测器偏振态传输模型,求解水下透射目标信息光的偏振度,并根据被动水下成像物理模型,引入水体衰减系数进行偏振度修正。户外实验结果表明,耀光抑制图像相较于 90° 偏振图像的区域对比度提升 25.3%,图像信噪比提升 78.4%,可有效抑制太阳耀光,突显水下目标物体,当太阳耀光偏振度远大于目标信息光偏振度时,本文方法的效果较佳。因此在实际遥感探测的过程中,建议调整

遥感器姿态使观测天顶角和太阳天顶角之和为 106° [29]。

尽管所提水面反射太阳耀光抑制方法在绝大多数场景中都有成效,但物理模型中光源仅考虑无偏直射太阳光,这与实际情况不符,尤其是在清晨、傍晚或多云天气,太阳直射光受大气粒子瑞利散射的影响,其偏振特性不能忽略;且实际海洋环境更为复杂,需考虑水体粒子对偏振光的前向散射效应。近年来,基于大气矢量辐射传输模型的天空光偏振特性 [30-31] 和水下偏振光传输模型 [32-33] 的研究为本文算法的优化提供了思路。在未来,为适应环境复杂时变、信息流庞大的智慧海洋场景,还需精准度更高、适应性更强的太阳耀光抑制方法。

参考文献:

- [1] PUHONG, DUAN. Texture-aware total variation-based removal of Sun glint in hyperspectral images [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 166: 359-372.
- [2] FELL F. A contrast minimization approach to remove Sun glint in landsat 8 imagery [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4643.
- [3] LIANG J A, WANG X, FANG Y J, *et al.* Water surface-clutter suppression method based on infrared polarization information [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4649-4658.
- [4] 李岩松, 赵慧洁, 李娜, 等. 基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测 [J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910004.
LI Y S, ZHAO H J, LI N, *et al.* Target detection based on mid-infrared polarization under the background of sea surface solar glare [J]. *China Industrial Economics*, 2022, 49(19): 1910004. (in Chinese)
- [5] HOCHBERG E J, ANDREFOUET S, TYLER M R. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41 (7): 1724-1729.
- [6] 周杨. 海面溢油耀光偏振遥感实验研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018: 20-36.
ZHOU Y. *Experimental study on Bright Polarized Remote Sensing of Oil Spill on The Sea Surface* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 20-36. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] WU X Y, LU Y C, JIAO J N, *et al.* Using Sea wave simulations to interpret the sunglint reflection variation with different spatial resolutions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-4.
- [9] 韩平丽. 水下目标偏振成像探测技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 17-33.
HAN P L. *Research on Polarization Imaging Detection Technology of Underwater Target* [D]. Xi'an: Xidian University, 2018: 17-33. (in Chinese)
- [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 (B12): 63-68.
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 (B12): 63-68. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] LIANG J A, 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] 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 H G, *et al.* Suppression technology for saturated water surface glint based on polarization characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2401009. (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.* Suppression method of water surface solar glare based on polarization radiation pattern 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.* Polarization filtering combined with polynomial fitting to suppress solar glow on water surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2401002. (in Chinese)
- [16] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(3): 570-587.
- [17] HAN P, LIU F, WEI Y, *et al.* Optical correlation assists to enhance underwater polarization imaging performance[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106256.
- [18] GUO Y H, SENTHILNATH J, WU W X, *et al.* Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform[J]. *Sustainability*, 2019, 11(4): 978.
- [19] HUANG S, TANG L N, HUPY J P, *et al.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(1): 1-6.
- [20] 申茜, 李俊生, 张兵, 等. 水面原位多角度偏振反射率光谱特性分析与离水辐射提取[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3269-3273.
- SHEN Q, LI J SH, ZHANG B, *et al.* Analyzing spectral characteristics of water involving *In-situ* multiangle polarized reflectance and extraction of water-leaving radiance[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3269-3273. (in Chinese)
- [21] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [22] ZHANG H, WANG M. Evaluation of Sun glint models using MODIS measurements[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(3): 492-506.
- [23] LU Y C, ZHOU Y, LIU Y X, *et al.* Using remote sensing to detect the polarized sunglint reflected from oil slicks beyond the critical angle[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(8): 6342-6354.
- [24] ROWE M P, Jr PUGH E N, TYO J S, *et al.* Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(6): 608-610.
- [25] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 59-61.
- LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 59-61. (in Chinese)
- [26] 于洪志, 孙春生, 胡艺铭. 一种全局参数估计的水下主动偏振去雾算法[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 107-113, 193.
- YU H ZH, SUN CH SH, HU Y M. Underwater active polarization defogging algorithm for global parameter estimation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 107-113, 193. (in Chinese)
- [27] DONALD B, MATHEW R. Refractive index-a key to understanding color differences[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 1988, 10(4): 205-209.
- [28] 刘笑茜, 冯龙庆, 张运林, 等. 浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 412-420.
- LIU X H, FENG L Q, ZHANG Y L, *et al.* Effects of hydrodynamic process on bio-optical properties in algal-dominated lake region of shallow lake[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(2): 412-420. (in Chinese)
- [29] 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.* Simu-

- lation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648-1653. (in Chinese)
- [30] 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.
ZHANG S, ZHAN J T, FU Q, *et al.* Simulation study on polarization characteristics of sky light in complex marine environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2201001. (in Chinese)
- [31] WANG C H, FENG Y Y, YANG Y H, *et al.* Chebyshev collocation spectral method for vector radiative transfer equation and its applications in two-layered media [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 243: 106822.
- [32] FOSTER R, GILSON A. Polarized transfer functions of the ocean surface for above-surface determination of the vector submarine light field[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9476-9494.
- [33] 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.
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. (in Chinese)

作者简介:



张聪立(1988—),男,浙江宁波人,博士研究生,2011年于北京科技大学获得学士学位,主要从事光学成像精密系统方面的研究。E-mail: zhangcongl@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:



虞益挺(1980—),男,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,2003年、2006年、2010年于西北工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事微纳光学成像与传感技术的研究。E-mail: yyt@nwpu.edu.cn