

基于偏振检测技术的海面太阳耀光抑制方法

邓宇^{1,2**}, 付强¹, 张肃¹, 李昌立^{2*}, 战俊彤¹, 李英超¹

¹吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了更好地抑制太阳耀光对海面目标探测的影响, 基于偏振检测技术并结合背景水体、太阳耀光与典型海洋目标三者之间的偏振特性差异提出了一种海面太阳耀光抑制方法。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, 结果表明, 在晴朗天气下对海面目标进行探测时, 背景辐射主要受太阳辐射从海面直接反射产生的辐亮度影响。可见光波长 550 nm 与 670 nm 对太阳耀光的抑制效果无明显差异, 均在 53° 观测天顶角附近、50°~60° 太阳天顶角方向以及太阳天顶角和观测天顶角之和为 106° 左右时对太阳耀光的抑制效果较好。该研究对于提升海面目标与太阳耀光背景图像的对比度以及海面太阳耀光背景下的目标检测效果具有重要意义。

关键词 海洋光学; 偏振检测; 太阳耀光; 海面目标; 背景抑制

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2001003

Method of Suppressing Sea Surface Solar Flare Based on Polarization Detection Technology

Deng Yu^{1,2**}, Fu Qiang¹, Zhang Su¹, Li Changli^{2*}, Zhan Juntong¹, Li Yingchao¹

¹Key Laboratory of Space Optoelectronic Technology in Jilin Province, Changchun, Jilin 130022, China;

²Faculty of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to better suppress the influence of solar flare on sea surface target detection, a sea surface solar flare suppression method is proposed based on polarization detection technology and the difference of polarization characteristics among background water body in this paper, solar flare and typical marine targets. The effects of observation zenith angle and solar zenith angle on the polarization of sea surface targets under the background of the solar flare and the contrast between sea surface targets and solar flare background are analyzed. The results show that when detecting sea surface targets in sunny weather, the background radiation is mainly affected by the irradiance caused by the direct reflection of solar radiation from the sea surface. There is no significant difference between the visible light wavelengths of 550 nm and 670 nm in the inhibition effect of solar flare. The inhibition effect of solar flare is better when the observation zenith angle is near 53°, 50°–60° solar zenith angle direction and the sum of solar zenith angle and observation zenith angle is about 106°. This research is of great significance to improve the contrast between the sea surface target and the solar flare background image and the target detection effect under the sea surface solar flare background.

Key words oceanic optics; polarization detection; solar flare; sea surface target; background suppression

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 290.5855

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2020-12-06; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61890963)、国家自然科学基金青年基金(61905025, 61705017)、长春理工大学创新基金(XJLJG-2018-17)

通信作者: *lcl_cust@126.com; **dengyu926@126.com

1 引言

随着海洋光学技术的不断发展,海洋目标监测、海洋水色遥感技术及相关装备也得到了不断更新与迭代。但海洋目标监测、海洋航空遥感、卫星遥感应用中,海面太阳耀光的存在给传感器带来了大量的耀光噪声干扰,使海上目标在太阳耀光背景中的对比度很小,严重影响了探测器的识别精度与性能以及对海洋目标的有效探测和海洋遥感信息的准确获取。1997年,潘德炉等^[1]在对FY-1B卫星图像的研究中发现,太阳耀光会导致20%~25%的卫星图像区域无法用于海洋水色监测。

海面太阳耀光是阳光经过海面(镜面面元)反射后在太阳光反射方向上产生强烈的反射辐射,从而形成一定区域的强烈太阳耀光^[2-3]。偏振是光的一个固有属性,也是一个独立于强度、波长和相位的光学信息维度^[4]。相关研究表明,海面太阳耀光具有明显的偏振特征^[5-6],太阳光具有强偏振的特点^[7],而水体本身属于低反射率的暗目标^[3]。Cooper等^[8-9]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,海表波浪上的太阳耀光与背景海水及背景海水与典型海洋目标的偏振特性也存在着一定差异,这为耀光的抑制提供了新思路。近年来,刘志刚等^[10]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。在此基础上,陈兴峰等^[7]分析了太阳几何和观测几何对反射率及偏振度的影响,进一步推导了太阳耀光偏振辐射模型。张卫国^[3]构建了一套偏振自适应滤波探测系统,在一定程度上能有效抑制太阳耀光的影响。陈卫等^[2,5]设计了一种基于双线偏振片的可见光偏振检测系统,并提出了一种基于偏振辐射图融合的太阳耀光抑制方法^[11],在一定程度上提升了海面耀光背景下的目标检测效果。

综上所述,偏振技术可以有效抑制太阳耀光,目前,人们已经开展了相关光学系统的设计以及太阳几何和观测几何对耀光偏振度和反射率影响的研究,但均未给出太阳几何和观测几何对太阳耀光影响的明确规律。因此,本文将偏振检测技术应用于海洋目标探测中,并结合背景水体、太阳耀光与典型海洋目标三者间的偏振特性差异,提出了一种用于太阳耀光背景下的海洋目标偏振检测方法,分析了太阳几何和观测几何对太阳耀光与海面目标偏振度及海面目标与耀光背景对比度的影响。实验结果表明,该方法可在实际工作任务中有效抑制

海面耀光噪声影响,增强海面太阳耀光背景下的目标对比度,提升海面太阳耀光背景下的目标检测效果,对海洋目标监测和海洋遥感应应用具有重要意义。

2 海面太阳耀光的抑制原理

2.1 海面太阳耀光的偏振分析

图1为偏振测量系统的原理,其中,海面以上的辐射 L_0 为目标辐射和背景辐射的总和,可表示为

$$L_0(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_t(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{bg}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi), \quad (1)$$

式中, L_t 为目标辐射, L_{bg} 为背景辐射, λ 为光的波长, θ_v 为探测系统的观测天顶角, θ_s 为太阳天顶角, φ 为 θ_v 和 θ_s 之间的方位角。考虑海面的红外辐射时, L_{bg} 可表示为

$$L_{bg}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_{sst}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{sky}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{sun}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi), \quad (2)$$

式中, L_{sst} 为海面的辐射亮度, L_{sky} 为太阳辐射亮度或天空辐射亮度漫反射产生的亮度, L_{sun} 为太阳辐射亮度从海面直接反射产生的辐射亮度,也被称为太阳耀光^[12]。一般来说,当强烈的太阳耀光使偏振探测器饱和时,海洋目标信号可能被太阳闪烁遮蔽。现场实验结果表明,偏振探测器饱和情况经常发生,这表明 L_{bg} 主要以 L_{sun} 为主。

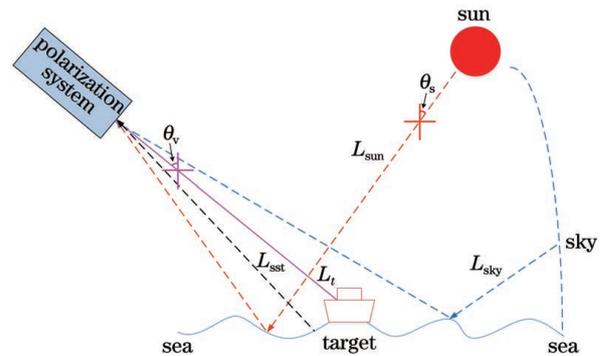


图1 偏振测量系统的原理

Fig. 1 Principle of the polarization measurement system

太阳光经过海面反射后会产生偏振效应,太阳耀光具有强偏振的特点,任何一束光都可以分解成垂直分量和水平分量。水表的入射光和反射光可分解为垂直于入射面和平行于入射面两个部分,可表示为^[4]

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)}, \quad (3)$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)}, \quad (4)$$

式中, R_s 为垂直分量的反射率, R_p 为水平分量的反射率, θ_i 为入射角, θ_r 为折射角。根据 Snell 定律可知^[4]

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r), \quad (5)$$

式中, n_1 为入射光一侧的介质折射率, n_2 为折射光一侧的介质折射率。可以发现, R_s 和 R_p 只取决于 $n_1 n_2$ 和 θ_i 。对于不同的 θ_i , 水表反射光会成为不同偏振程度的部分偏振光, 光的偏振程度即偏振度, 可表示为^[4]

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u}, \quad (6)$$

式中, I_p 为完全偏振光的强度, I_u 为自然光的强度。假设照射水表的太阳光是自然光, 则太阳耀光的偏振度可表示为

$$P = \frac{R_p - R_s}{R_p + R_s}. \quad (7)$$

目标表面的反射率表征的是反射辐亮度与入射辐亮度之间的关系, 可表示为

$$R(\lambda) = \frac{dL(\lambda)}{dE(\lambda)}, \quad (8)$$

式中, $R(\lambda)$ 为反射率, $L(\lambda)$ 为反射辐亮度, $E(\lambda)$ 为入射辐亮度。

偏振反射率表示的是总反射率中的偏振部分, 定义为反射辐亮度中偏振分量与入射辐亮度之间的比值, 可表示为

$$R_p(\lambda) = \frac{dL_p(\lambda)}{dE(\lambda)}, \quad (9)$$

式中, $R_p(\lambda)$ 为偏振反射率, $L_p(\lambda)$ 为反射辐亮度中的偏振分量。

目标表面的偏振度可以表征反射辐射的偏振分量与总反射辐射之间的比值, 除此之外, 分析太阳耀光抑制方法时还必须考虑太阳耀光的强度, 而耀光强度取决于太阳耀光的反射率。如果目标在耀光强度大的背景区域中同时具有较大的偏振反射强度, 则表明偏振技术可以有效抑制太阳耀光产生的噪声。由于海面目标产生的圆偏振效应很小, 假设圆偏振 $V=0$ 。此时, 在太阳主平面内, 如果观测天顶角为 θ_v , 则太阳耀光的光强可表示为

$$I(\theta_v) = \frac{1}{2} [I + Q \cos 2\theta_v + U \sin 2\theta_v], \quad (10)$$

根据(10)式测出 0° 、 60° 、 120° 三个线偏振方向的强度值, 得到前三个斯托克斯(Stokes)参数

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} [2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases}, \quad (11)$$

根据(11)式的计算结果得到对应的反射率和偏振反射率, 可表示为

$$\begin{cases} R = \frac{\pi I}{\mu_s E_0} \\ R_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_s E_0} \end{cases}, \quad (12)$$

式中, R 为反射率, R_p 为偏振反射率, I 、 Q 、 U 为斯托克斯参数, μ_s 为太阳天顶角的余弦, E_0 为与波段对应的大气辐射通量密度。由(12)式计算的偏振度可表示为

$$P = R_p / R, \quad (13)$$

由(10)式、(12)式、(13)式得到偏振度 P 与观测天顶角 θ_v 的关系, 进而得到目标在不同观测天顶角下的偏振度, 可表示为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{Q - 2Q \sin^2 \theta_v + U \sin 2\theta_v}. \quad (14)$$

2.2 基于双向偏振反射分布函数的太阳耀光抑制

海洋耀斑的线偏振度高^[12], 目标的双向反射分布特性不仅与入射光波长有关, 还与太阳几何和观测几何的位置密切相关^[13]。偏振度以太阳位置为中心, 偏振角关于太阳子午线对称; 且偏振度随太阳天顶角的增加逐渐变大^[14]。为了全面描述整个目标表面的多角度反射和偏振特性, 引入了双向反射分布函数(BRDF)和双向偏振反射分布函数(pBRDF)。其中, BRDF 可描述给定入射方向上辐亮度对给定出射方向上的辐射率, 具体原理如图 2 所示。

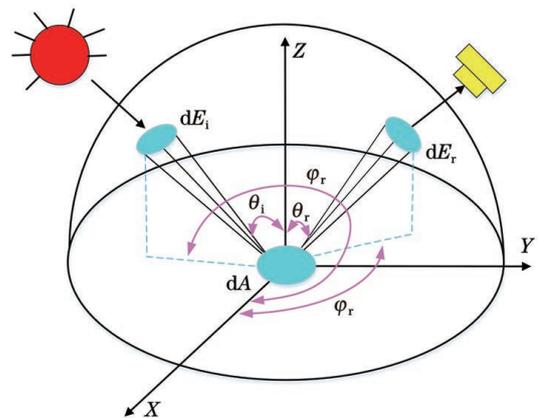


图 2 BRDF 的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the BRDF

目标的 BRDF 可表示为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}, \quad (15)$$

式中, θ 和 φ 分别为天顶角和方位角, 下标 i 和 r 分别表示入射和反射, $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 为海面目标反射的辐亮度, $dE_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 为太阳入射辐亮度。

为了更充分地反映海面目标与海面太阳耀光的偏振信息, 需要研究海面目标与海面太阳耀光的 pBRDF。pBRDF 为经过目标表面反射方向上偏振辐亮度 $dL_{rp}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 与沿太阳光入射方向到目标表面辐亮度 $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的比, 可表示为^[15]

$$F_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL_{rp}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dL_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}, \quad (16)$$

目标表面偏振度为反射辐亮度中偏振分量与总反射辐亮度之间的比值, 即

$$P(\lambda) = \frac{dL_{rp}(\lambda)}{dL_r(\lambda)}. \quad (17)$$

海面太阳耀光由镜面反射产生, 可用菲涅耳反射定律解释; 且当入射光以布儒斯特角入射时, 反射光是线偏振光^[16], 如图 3 所示。其中, α_i 为折射角, L_i 为折射辐射矢量。

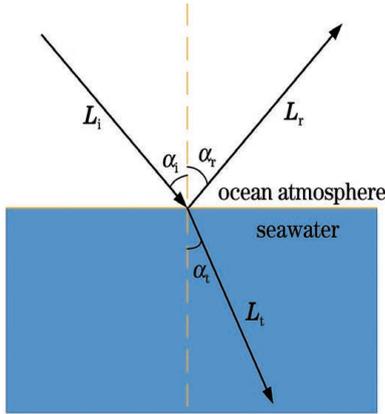


图 3 菲涅耳反射的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the Fresnel reflection

图 3 中, 入射辐射矢量 L_i 与经过海面的反射辐射矢量 L_r 之间的关系可表示为

$$L_r = F_r(\alpha_i)L_i, \quad (18)$$

式中, $F_r(\alpha_i)$ 为水面反射的 Mueller 矩阵, 可表示为

$$F_r(\alpha_i) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & 0 & 0 \\ \rho_{12} & \rho_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{33} & \rho_{43} \\ 0 & 0 & \rho_{34} & \rho_{44} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中,

$$\begin{cases} \rho_{11} = XX^* + YY^* \\ \rho_{12} = XX^* - YY^* \\ \rho_{33} = YX^* + XY^* \\ \rho_{34} = YX^* + YX^* \\ \rho_{43} = YX^* - XY^* \\ \rho_{44} = YX^* + YX^* \end{cases}, \quad (20)$$

$$\begin{cases} X = -\frac{n_{\text{water}}^2 \times \cos \alpha_i - \sqrt{n_r^2 - 1 + \cos^2 \alpha_i}}{n_{\text{water}}^2 \times \cos \alpha_i + \sqrt{n_r^2 - 1 + \cos^2 \alpha_i}} \\ Y = \frac{\cos \alpha_i - \sqrt{n_r^2 - 1 + \cos^2 \alpha_i}}{\cos \alpha_i + \sqrt{n_r^2 - 1 + \cos^2 \alpha_i}} \end{cases}, \quad (21)$$

式中, 上标 * 表示共轭复数, n_{water} 为水体的折射率, 一般取 1.33。当光线从大气入射到水体时, 海面大气折射率 $n_{\text{air}} = n_{\text{water}}$ 。空气的折射率可表示为^[17]

$$n_{\text{air}} = 1 + \left(834213 + \frac{2406030}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{15997}{38.9 - \lambda^{-2}} \right) \times \frac{1.04126 \times 10^{-5}}{3671T - 2733.65} P, \quad (22)$$

式中, P 为气压, T 为绝对温度。水体折射率可表示为^[7]

$$\begin{aligned} \frac{n_{\text{water}}^2 - 1}{(n_{\text{water}}^2 + 2)\rho'} &= a_0 + a_1\rho' + a_2T' + a_3(\lambda')^2T' + \\ &\frac{a_4}{(\lambda')^2} + \frac{a_5}{(\lambda')^2 - (\lambda'_{\text{UV}})^2} + \frac{a_6}{(\lambda')^2 - (\lambda'_{\text{IR}})^2} + a_7(\rho')^2, \end{aligned} \quad (23)$$

式中, λ'_{UV} 为紫外波长, λ'_{IR} 为红外波长, 海水密度 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, $\rho' = \rho/1000 = 1.025 \text{ kg/m}^3$, 其他参数的取值均参考文献[7]给出。

图像对比度能反映目标灰度相对背景灰度反差的大小, 具有显著性特征。因此, 用图像对比度量化评价并分析目标与耀光背景的偏振图像, 分别从 S_0 光强图像和偏振度 (DOP) 图像中选择对应位置目标和耀光背景中的感兴趣区域 (ROI), 用于目标与耀光背景的对对比度计算。目标相对背景的对对比度可表示为^[18]

$$C = \frac{|I_t - I_b|}{I_t + I_b}, \quad (24)$$

式中, I_t 为目标强度, I_b 为背景强度。目标与耀光背景的偏振对比度可表示为^[15]

$$C_p = \left| \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} \right|, \quad (25)$$

式中, P_t 为目标的偏振度, P_b 为耀光背景的偏振度。由 (16) 式~(25) 式可知, 当入射光为自然光时, 太阳入射角 θ_i 与目标和耀光背景偏振对比度 C_p 的

关系如图 4 所示。

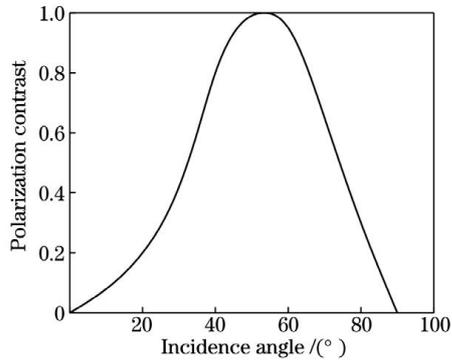


图 4 θ_i 与 C_p 的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between θ_i and C_p

由上述理论可知,可通过获得不同情况下的空间多角度偏振反射光谱,分析太阳入射角的变化对水面反射辐射偏振度的影响规律。当入射光为自然光,太阳入射角为布儒斯特角时,反射光为完全偏振光,其振动面垂直于入射面。此外,可通过获取不同探测器观测天顶角与海面目标偏振度的关系,分析探测器不同观测天顶角对海面目标偏振度的影响。结合背景水体、太阳耀光与典型海洋目标三者之间的偏振特性差异,根据太阳位置几何与观测几何对太阳耀光背景下海面目标偏振度的影响控制探测

器的姿态,以抑制海面的太阳耀光。还可以根据探测器的实际任务需求,针对不同海域气压和海水温度及海水密度的海-气界面折射率自适应调整系统参数,使探测结果更准确。

3 太阳耀光抑制实验

为验证该太阳耀光抑制方法的有效性,在真实天空光情况下对水面太阳耀光背景中 3 个不同大小目标进行偏振探测实验,实验设备包括 BRDF 测量架、模拟目标、全斯托克斯偏振相机(SALSA),如图 5 所示。将目标置于太阳耀光的中心,用全斯托克斯偏振相机测量背景水体、太阳耀光及水面目标的偏振特性。测试天气晴朗少云,测量时间为 7:00—17:00,太阳天顶角的变化范围为 $-85^\circ \sim 85^\circ$,变化步长为 1° ,太阳方位角的变化范围 $-70^\circ \sim -85^\circ$,观测方位选取太阳-目标主平面,即观测-太阳的相对方位角为 180° 。设太阳天顶角为 60° ,在入射条件一定时,采集不同观测天顶角入射情况下目标与太阳耀光的 S0 和 DOP 图像;设观测天顶角 θ_v 为 53° ,在观测天顶角一定时,采集不同太阳天顶角入射情况下目标与太阳耀光的 S0 和 DOP 图像。

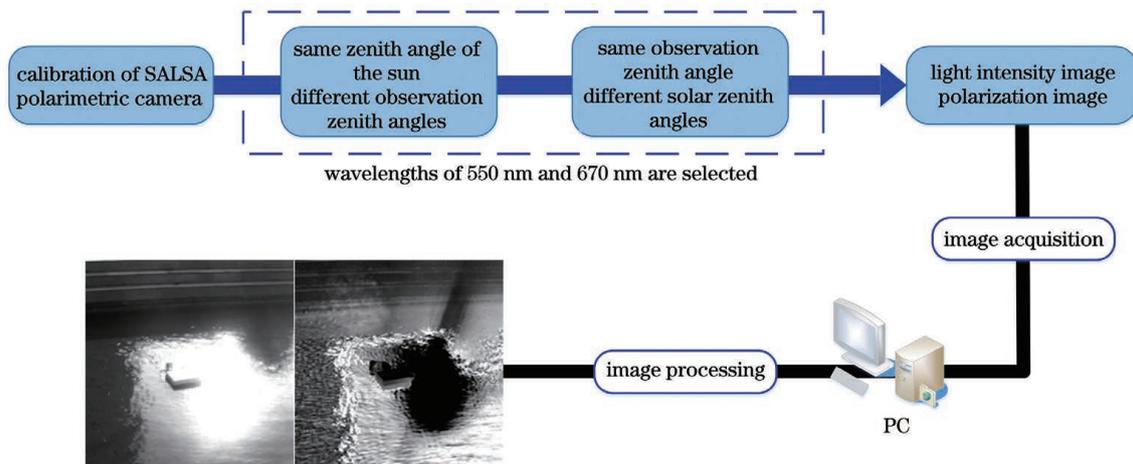


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

基于太阳耀光的偏振特性和水面波浪的动态特性,采用美国 Bossa Nova 公司生产的 SALSA 全斯托克斯偏振成像仪,在红绿蓝三色波段(490 nm、550 nm、670 nm)上实现全偏振测量,同时对每个像素单元的全斯托克斯偏振矢量进行实时测量和显示,如斯托克斯参量、偏振度、偏振角、椭圆度。光谱响应范围为 $450 \sim 750$ nm,相机焦距为 12 mm,像元尺寸为 $3.5 \mu\text{m}$,成像分辨率为 1040×1040 ,可同时

获得 0° 、 45° 和 90° 方向的偏振辐射图像。图 6 为该偏振成像仪的结构及实物图,其中, θ_{pol} 为线偏振片的旋转角度, $\theta_{\lambda/4}$ 为 $\lambda/4$ 的旋转角度。不同于大多数偏振相机, SALSA 全偏振相机具有良好的线性和实时稳定性,可对每个像素单元的全斯托克斯偏振矢量进行实时测量与显示。其中, PSG 为偏振态产生器, PSA 为偏振态分析器。通过调制 PSG 与 PSA 完成对样品偏振像差的测量,为了提高偏振像

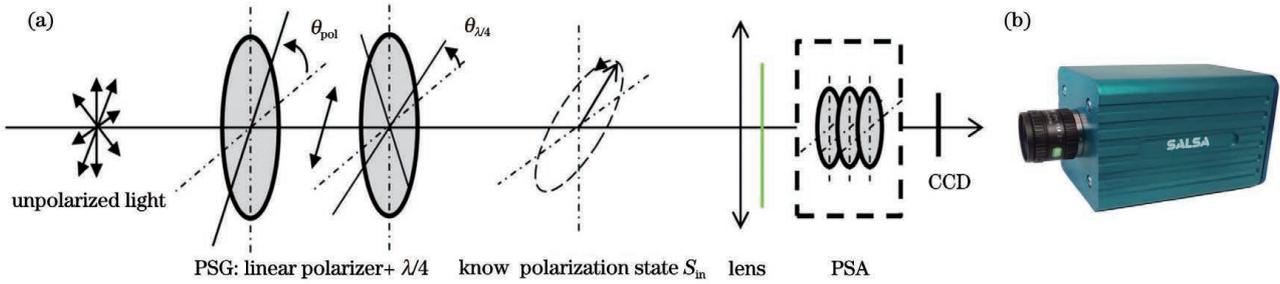


图 6 SALSALSA 全偏振相机。(a)结构图;(b)实物图

Fig. 6 SALSALSA full polarization camera. (a) Structure diagram; (b) physical map

差的测量精度,需对 Mueller 矩阵偏振仪进行标定。定标结果表明,偏振检测精度在不同波段具有不同的表现,490 nm 波段测量偏振度与真实偏振度的偏差较大,最大偏差为 8.5%;550 nm 和 670 nm 波段测量偏振度与真实偏振度相差不大,最大偏差分别为 1.8%和 1.2%。当出射光的偏振度为 0.3 左右时,490 nm、550 nm 和 670 nm 波段测量偏振度与真实偏振度的最大偏差分别为 3.18%,0.75%和 0.31%;当出射光的偏振度为 0.8 左右时,490 nm、550 nm 和 670 nm 波段测量偏振度与真实偏振度的最大偏差分别为 8.5%,1.8%和 1.2%。为了尽可能地减小误差,保证测试结果的可靠性,选用 550 nm 和 670 nm 波段进行测试实验。

4 实验结果

4.1 偏振实验测试结果

选取相同大小的目标与耀光背景 ROI 进行进一步处理,如图 7 所示。根据目标与耀光背景的 S0 光强与 DOP 偏振图像可知,不同观测几何和太阳几何对太阳耀光的抑制效果有明显差异,表现为目标与太阳耀光背景对比度及偏振图像中耀光的面积大小差异。550 nm 与 670 nm 波段下,目标与耀光背景对比度随观测天顶角和太阳天顶角的变化情况如图 8 和图 9 所示。

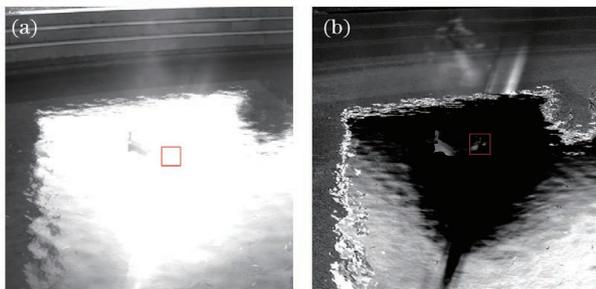


图 7 目标与耀光背景 ROI 的选取。(a)耀光背景;(b)目标

Fig. 7 Selection of target and glare background ROI.

(a) Glare background; (b) target

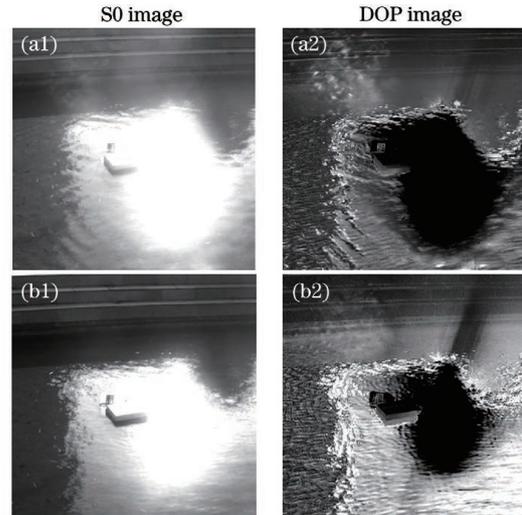


图 8 550 nm 波段下目标与耀光背景对比度的变化图像。

(a)观测天顶角;(b)太阳天顶角

Fig. 8 Image of the change in contrast between the target and the glare background in the 550 nm band.

(a) Observation zenith angle; (b) solar zenith angle

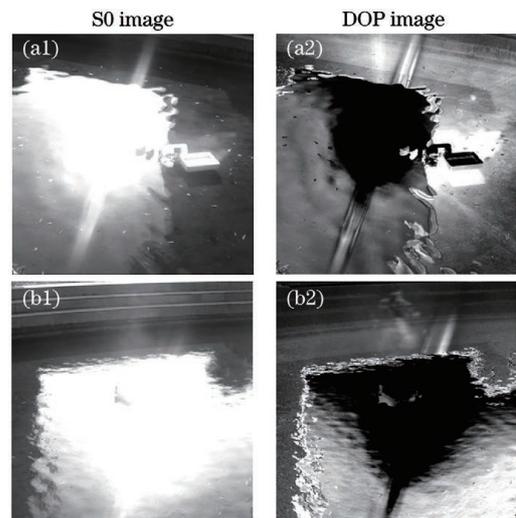


图 9 670 nm 波段下目标与耀光背景对比度的变化图像。

(a)观测天顶角;(b)太阳天顶角

Fig. 9 Image of the change in contrast between the target and the glare background in the 670 nm band.

(a) Observation zenith angle; (b) solar zenith angle

4.2 数据分析

根据目标与太阳耀光背景对比度差异明显的特征,分析在一定入射条件下,观测天顶角对目标与太阳耀光对比度变化趋势的影响。在太阳主平面内入射条件保持不变,光谱波段为 550 nm 和 670 nm 情况下,观察目标与太阳耀光的 DOP 对比度随观测天顶角 θ_v 在 $10^\circ \sim 60^\circ$ 范围内的变化趋势,结果如图 10 所示。可以发现,DOP 对比度先由 10% 增大到 98% 再减小到 90% 左右,在观测天顶角 53° 附近形成一个小波峰。由(14)式可知,观测天顶角 θ_v 为 53° 时,目标偏振度最大,趋近于 1,该区间内的太阳耀光偏振度均为 0.0039。这表明在观测天顶角

θ_v 为 53° 时,目标与耀光背景的偏振对比度最大;观测天顶角越偏离 53° ,目标与耀光背景的偏振对比度也就越小。根据菲涅耳反射原理得出水体的布儒斯特角为 53° ,即水面耀光在 53° 观测天顶角方向时,平行入射面的入射能量大部分会被折射或吸收。当观测天顶角在布儒斯特角附近时,水体的偏振反射更弱,可以很好地避免太阳耀光。此外,目标与耀光背景的 S0 对比度在 $0\% \sim 20\%$ 范围内上下波动,变化趋势无明显规律。这表明偏振探测可以很好地抑制太阳耀光噪声,在太阳天顶角一定的情况下,目标在 53° 观测天顶角方向附近对太阳耀光的抑制效果最好。

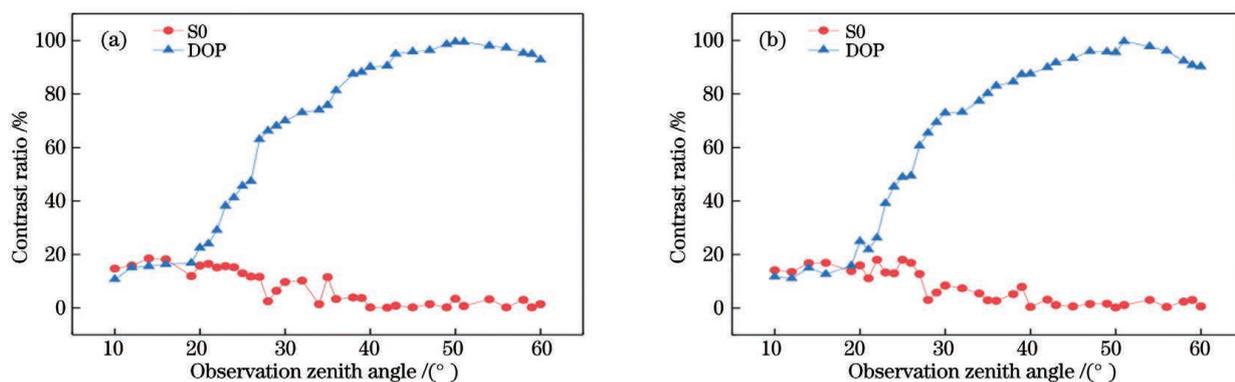


图 10 目标与太阳耀光对比度随观测天顶角的变化曲线。(a) 550 nm;(b) 670 nm

Fig. 10 Change curve of the contrast between the target and the solar flare with the observation zenith angle.

(a) 550 nm; (b) 670 nm

对观测天顶角的分析结果表明,抑制太阳耀光的最佳观测角为 53° ,因此,保持观测天顶角 53° 不变,分析太阳天顶角的变化对目标与太阳耀光 S0、DOP 对比度的影响,结果如图 11 所示。可以发现,当太阳天顶角由 -85° 减小到 -65° 时,目标偏振度增大,DOP 对比度由 15% 增大到 99%;且在太阳天顶角为 -65° 时,目标偏振度存在极值,DOP 对比度

为 99%,在此处形成波峰。当太阳天顶角减小到 -10° 时,目标偏振度趋近于 0,DOP 对比度也趋近于 0%,在此处形成波谷;当太阳天顶角增大到 60° 附近时,偏振度有极值,DOP 对比度为 99%,此时,DOP 对比度形成波峰;当太阳天顶角继续增大到 80° 时,入射角不断增大,目标偏振度不断减小,DOP 对比度减小到 5% 左右,DOP 对比度的整体变化趋

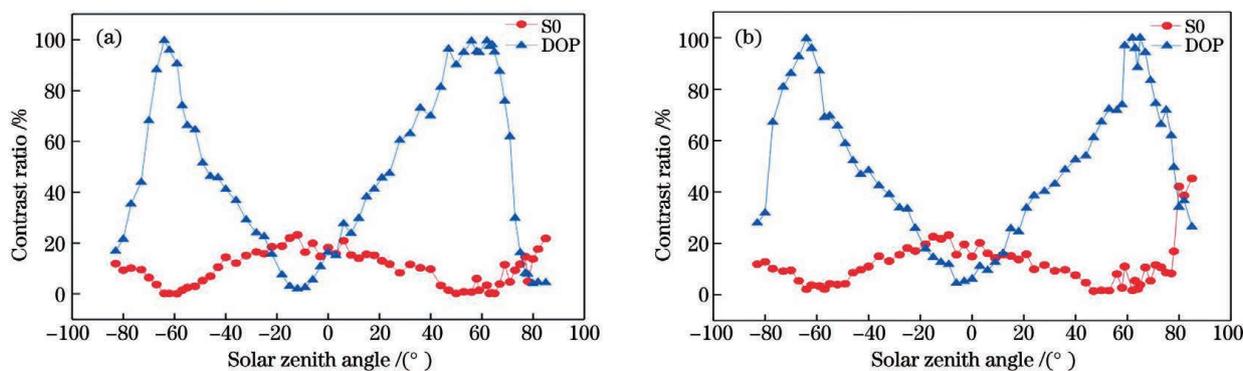


图 11 观测天顶角为 53° 时目标与耀光对比度随太阳天顶角的变化曲线。(a) 550 nm;(b) 670 nm

Fig. 11 Change curve of the contrast between the target and the flare with the solar zenith angle when the observation zenith angle is 53° . (a) 550 nm; (b) 670nm

势呈“M”形。太阳光穿过大气介质时会产生大气散射,且不同时刻天空光散射带来的影响不同,上午和下午 DOP 对比度峰值对应的太阳天顶角略有差别。当太阳天顶角在 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内时,探测器接收到的光强较弱, S0 对比度相对较大;当太阳天顶角在 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内时,探测器接收到的光强相对较大,此时目标周围的漫反射强度相对其他角度略低,目标本身产生的反射强度相对更强。可以发现,随着太阳天顶角的变化, S0 对比度的变化趋势大致呈小“W”形,且 S0 对比度总体较低,在 $0\%\sim 20\%$ 范围内变化。

5 结 论

通过理论分析与实验验证,得到室外天空光散射环境下观测几何和太阳位置几何对太阳耀光的抑制效果。结果表明,偏振探测可以很好地抑制太阳耀光噪声,保持探测器在太阳主平面内,观测天顶角在 53° 方向附近、太阳天顶角为 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时对太阳耀光的抑制效果更佳。当太阳天顶角和探测器观测天顶角的和为 106° 左右时,入射角和反射角均为 53° , 反射光线偏振度对比度接近 100% 。此外,根据实际探测任务需要,结合实际海洋环境中海水的折射率变化(海水折射率随温度的升高而减小,随盐度的增大而增大)以及大气散射和天空光散射的影响适当调整观测几何,可以更好地抑制太阳耀光背景,提升海面目标与海面太阳耀光背景的对对比度;且本方法具有普适性和灵活性,对实际任务中探测器的姿态控制具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Pan D L, Doerffer R, Mao T M, et al. Study on radiation simulation image of ocean aquatic satellite [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(6): 43-55.
潘德炉, Doerffer R, 毛天明, 等. 海洋水色卫星的辐射模拟图像研究 [J]. *海洋学报(中文版)*, 1997, 19(6): 43-55.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Liao Y B. Polarized light [M]. Beijing: Science Press, 2003: 19-32.
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 19-32.
- [5] Mobley C D. Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4828-4849.
- [6] Hieronymi M. Polarized reflectance and transmittance distribution functions of the ocean surface [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): A1045-A1068.
- [7] Chen X F, Gu X F, Cheng T H, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sun glint [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.
- [8] Cooper A W, Lentz W J, Walker P L, et al. Infrared polarization measurements of ship signatures and background contrast [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2223: 300-309.
- [9] Cooper A W, Lentz W J, Walker P L. Infrared polarization ship images and contrast in the MAPTIP experiment [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2828: 85-96.
- [10] Liu Z G, Zhou G H. Polarization of sun glint [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(5): 362-365.
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.
- [11] 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.
- [12] Zhang Y P, Hu X Q, Yin D K, et al. Onboard polarization calibration technique of multi-angle polarization imager based on sun glint from ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1528002.
张一鹏, 胡秀清, 殷德奎, 等. 基于海洋耀光的多角度偏振成像仪在轨偏振定标技术 [J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1528002.
- [13] Li J J. Research on the optical polarized radiation characteristics of sea targets [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 32-34.
李金金. 海洋目标光学偏振辐射特性研究 [D]. 合

- 肥: 中国科学技术大学, 2017: 32-34.
- [14] 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.
- [15] Zou X F, Wang X, Jin W Q, et al. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 304-308.
邹晓风, 王霞, 金伟其, 等. 大气对红外偏振成像系统的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 304-308.
- [16] Ye Q Y, Wang X J, Dai Z H. Study on propagation characteristics of gaussian beam incident at Brewster angle [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 0720001.
叶俏珏, 王先菊, 戴占海. 布儒斯特角入射的高斯光束传输特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(7): 0720001.
- [17] Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al. Calibration of the degree of linear polarization measurement of polarized radiometer using solar light [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(8): 1249-1256.
- [18] 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.