

## 基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测

李岩松<sup>1</sup>, 赵慧洁<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>1,2\*</sup>, 贾国瑞<sup>1</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191;<sup>2</sup>北京航空航天大学人工智能研究院, 北京 100191

**摘要** 针对海面太阳耀光背景下传感器受到强干扰而无法有效探测的问题,本文提出了太阳耀光场景下的自适应偏振探测方法。根据太阳耀光辐射分量的偏振特性,本团队设计了单/双偏振片观测模式,搭建了中红外偏振探测系统。先根据计算得到的不同场景下的耀光辐射,切换相应的工作模式进行耀光抑制,以增强目标在图像中的对比度;然后结合图像处理滤波算法,对不同太阳耀光背景下的船体目标进行有效探测。两种工作模式被用于太阳耀光抑制实验:针对远距离、近布儒斯特角观测实验场景,选择单偏振片观测模式即可有效凸显目标,然后结合形态学滤波算法就可实现目标探测;针对近距离、近水平角观测实验场景,选择双偏振片观测模式,可在有效抑制太阳耀光水平分量的同时对残留的垂直分量进行抑制,然后结合管道滤波算法即可实现目标探测。野外实验结果表明,本文提出的两种偏振探测模式均可有效削弱不同场景下的海面太阳耀光辐射,有利于提升偏振系统对不同场景的适应能力。

**关键词** 探测器; 偏振成像; 太阳耀光; 中红外偏振探测; 目标探测

**中图分类号** O436

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1910004

## 1 引言

当利用中波红外成像系统对海面舰船目标进行探测或持续监视时,可能面临强烈的太阳耀光干扰,使目标淹没在背景中。海面太阳耀光<sup>[1]</sup>是海面对太阳光产生镜面反射形成的强辐射信号,其辐射能量是水体自身或目标辐射能量的几十倍<sup>[2]</sup>,易导致光学成像探测器饱和,从而丢失目标。

国内外研究机构对海面太阳耀光的产生机理展开了研究,并发现其具有很强的偏振特性。Cox 等<sup>[3]</sup>最早针对海面太阳耀光进行了研究,他们认为海面背景是具有不同方向的小镜面的组合,并提出了斜坡概率模型。Cooper 团队<sup>[4-5]</sup>利用斜坡面元分布函数分析了太阳耀光的偏振特性。刘志刚等<sup>[6]</sup>对太阳耀光的偏振特性进行了研究,并从理论上分析了利用偏振消除太阳耀光的可行性。基于此,国内外学者利用偏振器件搭建探测系统,实现了对太阳耀光的抑制。如:Fougnie 等<sup>[7]</sup>基于水平偏振片进行了太阳耀光抑制实验;Cremer 等<sup>[8]</sup>利用可旋转的中红外偏振片搭建探测系统,测量了海面目标及背景的偏振特性;邓宇等<sup>[9]</sup>在可见光波段内,张卫国<sup>[10]</sup>通过设计双波段系统,韩平丽<sup>[11]</sup>利用渥拉斯顿棱镜搭建中波红外系统,张景华<sup>[12]</sup>通过对长波红外海面场景进行偏振建模,分别进行了太阳耀光抑制实验,并取得一定效果。研究人员

利用偏振度图像进行了太阳耀光抑制方面的研究,如:Tuo 等<sup>[13]</sup>通过融合偏振度和强度图,实现了目标对比度的增强;叶松等<sup>[14]</sup>通过对同时获取的三个线偏振方向(0°、45°、90°)上的图像进行融合处理实现了对太阳耀光的抑制。以上方法均是利用单偏振片对太阳耀光进行抑制,但单偏振片系统的抑制效果取决于太阳、目标及探测器的几何位置,而且在不同的海面观测场景下,太阳耀光的偏振特性及方向反射率不同,这些因素限制了该方法的探测效果。陈卫等<sup>[15-16]</sup>设计了双线偏振片系统,该系统取得了良好的对比度增强效果,但应用场景适用性仍比较有限。

根据前人研究的相关结果,本团队在分析海面太阳耀光红外偏振特性的基础上,设计并搭建了可切换的双偏振片探测系统;然后根据不同探测距离和不同观测角度下太阳耀光的辐射类型,选取对应的工作模式,对太阳耀光进行了抑制;最后分别结合图像形态学滤波及管道滤波算法,实现了太阳耀光背景下舰船目标的提取。

## 2 海面太阳耀光偏振探测的机理

## 2.1 海面背景下的目标探测

利用中波红外系统进行海面目标探测时,探测器接收到的辐射  $L_{\text{sensor}}$  为海面背景辐射  $L_{\text{bg}}$  与目标辐射  $L_{\text{tg}}$ ,即

$$L_{\text{sensor}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_{\text{bg}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{\text{tg}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi), \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $\theta_v$  为探测器的观测天顶角;  $\theta_s$  为太阳天顶角;  $\varphi$  为探测器的观测方位角。其中, 海面背景辐射  $L_{\text{bg}}$  由三部分组成, 分别为海面自发辐射  $L_{\text{sea}}$ 、反射的天空光背景辐射  $L_{\text{sky}}$  以及海面镜面反射的太阳光辐射  $L_{\text{glint}}$ , 即

$$L_{\text{bg}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) = L_{\text{sea}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{\text{sky}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi) + L_{\text{glint}}(\lambda, \theta_v, \theta_s, \varphi). \quad (2)$$

镜面反射的太阳光辐射  $L_{\text{glint}}$  即太阳耀光, 其辐射能量最强, 因此, 在太阳耀光背景区域内可忽略另外两项辐射的影响。对于太阳耀光区域内的海面目标, 由于观测角度的限制, 在一定程度上可将其视为朗伯体, 其辐射能量与太阳耀光相比较弱。为简化计算, 可认为海面目标辐射为非偏振辐射<sup>[8]</sup>。因此, 利用目标与太阳耀光之间偏振特性的差异可以凸显目标。探测器接收海面目标辐射的示意图如图 1 所示<sup>[2]</sup>。

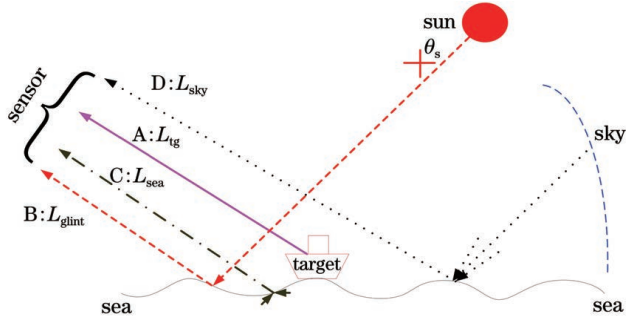


图 1 探测器接收海面目标辐射示意图

Fig. 1 Schematic of detector receiving radiation from the sea surface target

## 2.2 太阳耀光的偏振特性

太阳光本身是非偏振自然光, 经过海面镜面反射后具有强偏振特性。海面太阳耀光的形成与探测器的观测天顶角、太阳的天顶角和方位角以及海水表面反射率等参数有关。按照 Cox 和 Munk 的斜坡概率模型, 海面是由许多具有不同法线方向的小镜面微面元组合而成的。每一部分受到探测波段、观测条件等因素的影响, 探测器探测到的海面背景辐射是多个背景组成部分相互叠加之后得到的。不同方向上的反射存在差异, 且具有一定的方向性, 因此海面背景的方向反射率<sup>[17]</sup>为

$$\rho_{\text{glint}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, W) = \frac{\pi R_f(\omega, \lambda) p(\alpha, W)}{4 \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) \cos^4(\alpha)}, \quad (3)$$

式中:  $p(\alpha, W)$  为海面背景小镜面微面元的概率分布函数;  $\alpha$  和  $W$  分别为小镜面斜坡的倾斜角度和风速;  $R_f(\omega, \lambda)$  为海面背景微面元的 Fresnel 镜面反射率, 其中  $\omega$  为太阳入射角,  $\lambda$  为波长。在太阳耀光覆盖区域内构成海面起伏的某个斜坡上, 可视太阳光为镜面反射。根据菲涅耳定律, 海面背景微面元 Fresnel 镜面反射率  $R_f(\omega, \lambda)$  和偏振反射率  $R_{\text{polar}}(\omega, \lambda)$  分别为

$$R_f(\omega, \lambda) = \frac{R_{\text{glint}}^s(\omega, \lambda) + R_{\text{glint}}^p(\omega, \lambda)}{2}, \quad (4)$$

$$R_{\text{polar}}(\omega, \lambda) = \left| \frac{R_{\text{glint}}^s(\omega, \lambda) - R_{\text{glint}}^p(\omega, \lambda)}{2} \right|, \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} R_{\text{glint}}^s(\omega, \lambda) = \left| \frac{\cos(\omega) - n(\lambda) \cos(\omega_r)}{\cos(\omega) + n(\lambda) \cos(\omega_r)} \right|^2 \\ R_{\text{glint}}^p(\omega, \lambda) = \left| \frac{n(\lambda) \cos(\omega) - \cos(\omega_r)}{n(\lambda) \cos(\omega) + \cos(\omega_r)} \right|^2 \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $\omega_r$  为光线的折射角;  $n(\lambda)$  为折射率;  $R_{\text{glint}}^s(\omega, \lambda)$  和  $R_{\text{glint}}^p(\omega, \lambda)$  分别为太阳耀光 s 波分量(平行于入射面)与 p 波分量(垂直于入射面)的反射率。利用式(3)~(5)可求得海面背景偏振反射率为

$$\rho_{\text{polar-gl原因}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, W) = \frac{\pi R_{\text{polar}}(\omega, \lambda) p(\alpha, W)}{4 \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) \cos^4(\alpha)}. \quad (7)$$

据此, 可以计算特定几何观测条件下到达探测器的太阳耀光偏振辐射量  $L_{\text{polar-gl原因}}$ , 计算公式为

$$L_{\text{polar-gl原因}} = \frac{T(\lambda) \rho_{\text{polar-gl原因}} E_0 \cos(\theta_s)}{\pi} = \frac{T(\lambda) E_0 \rho_{\text{polar-gl原因}} R_{\text{polar}}(\omega, \lambda) p(\alpha, W)}{4 \cos(\theta_v) \cos^4(\alpha)}, \quad (8)$$

式中:  $T(\lambda)$  为路径上的大气透过率;  $E_0$  为入射到海面的太阳辐照度。

根据前期研究<sup>[18-19]</sup>, 太阳耀光为部分偏振光, 在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  中波红外范围内, 当入射角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化时, 海面太阳耀光辐射的偏振度始终为正值, 这说明海面太阳耀光辐射的 s 波分量占主要优势。当入射角在布儒斯特角(约  $57^\circ$ )附近时, p 波消失, 太阳耀光变为完全偏振光, 此时海面太阳耀光辐射呈水平偏振态。因此, 通过偏振探测抑制中红外海面太阳耀光时, 在探测系统前加一片垂直偏振片, 就可以提升图像对比度; 但需要太阳高度角、目标以及观测角度严格限定在一定范围内, 否则, 由于单偏振片只抑制了太阳耀光中的 s 波分量, 透过的 p 波分量的辐射能量足够大, 仍会使探测器饱和。

## 3 基于中波红外偏振的海上目标探测系统

本团队搭建的红外偏振探测系统由中波红外 HgCdTe 相机和两片偏振片(偏振片 1 和偏振片 2)组成, 其性能参数如表 1 所示。为适应多种探测场景, 偏振片 1 放置在系统探测器前, 偏振片 2 放置在可旋转支架上。根据太阳耀光的类型和能量大小, 选择是否使用偏振片 2, 从而可以满足多场景需求。太阳耀光辐射能量可以根据第 2 节所述理论计算得到, 其偏振辐射类型、大小与观测点的海面状况、观测几何条件、路径上的大气透过率相关。系统示意图如图 2 所示。

表 1 中波红外双偏振片探测系统性能参数

Table 1 Performance parameters of mid-infrared dual-polarizer detection system

Performance index	Parameter value
Working band / $\mu\text{m}$	3–5
$F$ number	2
Focal length /mm	100
Field of view	$4.4^\circ \times 5.5^\circ$
Number of pixels	$320 \times 256$
Pixel size /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	$30 \times 30$
Polarizer	$\text{CaF}_2$ , extinction ratio is 200 : 1, average transmittance is 88.6%

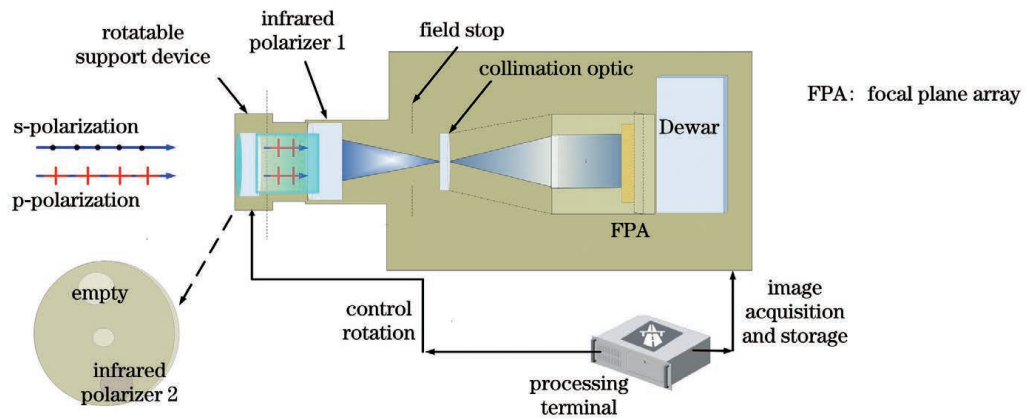


图 2 中波红外双偏振片探测系统示意图

Fig. 2 Schematic of mid-infrared dual-polarizer detection system

图 2 中,偏振片 2 位于旋转支撑结构件上,当旋转至 empty 时,为单偏振片工作模式。在后续的硬件设计中,拟将偏振片 1 也放置在此类选装支撑结构件上,以便实现红外全色探测与偏振探测的切换。

对于中红外偏振探测系统,图像 DN (digital number) 值与目标辐射亮度  $L_{\text{polar}}$  之间的关系可由系统的辐射定标决定,可表示为

$$V_{\text{DN}} = a \cdot L_{\text{polar}} + b, \quad (9)$$

式中: $a$  和  $b$  分别为辐射定标增益系数与偏差值。太阳耀光使红外探测器饱和的实质是太阳耀光对应的红外成像探测器灰度 DN 值超过探测器最大灰度量化范围,即

$$a \cdot L_{\text{polar-glnt}} + b = 2^N - 1, \quad (10)$$

式中: $N$  为探测器量化位数。由于太阳耀光辐射远大于海面目标辐射,探测器饱和<sup>[15]</sup>,此时,目标到达探测器的辐射导致 DN 值的变化无法得到准确测量,太阳耀光辐射完全将海面目标辐射淹没。

单片工作模式:根据第 2 节所述的太阳耀光计算公式,考虑理想条件下,观测角度与太阳天顶角相等且为布儒斯特角时,太阳耀光的 p 波分量的镜面反射率为 0,  $L_{\text{polar-glnt}}$  为完全偏振光 s 波分量,有  $L_{\text{polar-glnt}} = L_{\text{polar-glnt}}^{\text{s-polarized}}$ 。此时,在探测系统前加一片垂直偏振片,太阳耀光的 s 波分量被完全抑制。若观测角度在布儒斯

特角度附近,则远距离场景下的太阳耀光仍以 s 波分量为主,有  $L_{\text{polar-glnt}}^{\text{s-polarized}} \gg L_{\text{polar-glnt}}^{\text{p-polarized}}$ 。经过垂直偏振片后,太阳耀光的 s 波分量被抑制,残留的 p 波分量所占份额很小,即  $a \cdot L_{\text{polar-glnt}}^{\text{p-polarized}} + b < 2^N - 1$ 。此种情况下,利用单片工作模式,探测器即可有效获取目标。

双片工作模式:若观测角度远离布儒斯特角,此时太阳耀光 s 波分量与 p 波分量的辐射相当,这意味着 s 波分量与 p 波分量相差不大,且由于观测近距离太阳耀光, s 波分量与 p 波分量辐射均较强,若采用单片工作模式,垂直偏振片只能消除 s 波分量, p 波分量对应的红外辐射能量仍可能使探测器饱和 ( $a \cdot L_{\text{polar-glnt}}^{\text{p-polarized}} + b = 2^N - 1$ ), 探测器无法有效获取目标。因此,在原有垂直偏振片前再加一片可旋转偏振片(两片偏振片的夹角为  $\theta_p$ ), 该偏振片可再次抑制太阳耀光中的 p 波分量,此时到达探测器的太阳耀光辐射为

$$a \cdot L_{\text{polar-glnt}}^{\text{p-polarized}} \cos^2(\theta_p) + b < 2^N - 1. \quad (11)$$

两片偏振片可进一步削弱太阳耀光,从而增强目标在图像中的对比度。文献[19]给出了在一定探测条件下,且太阳天顶角、探测天顶角一定的情况下,两片偏振片最佳角度的选取。双偏振片模式可以进一步抑制 p 波偏振分量,从而压缩太阳耀光的饱和效应,凸显目标。

图 3 给出了两种观测模式示意图。图 3(a) 显示

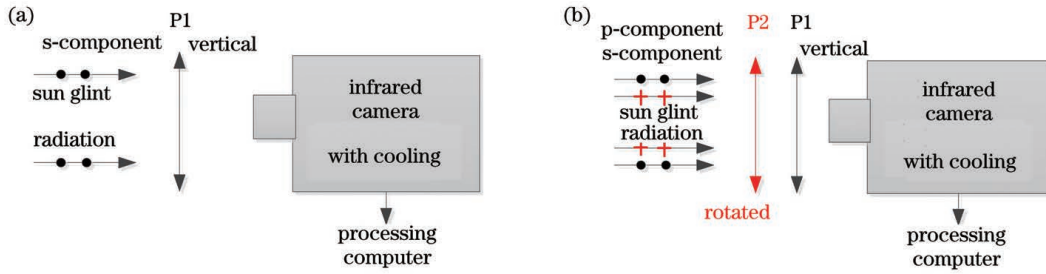


图 3 观测模式。(a)单偏振片观测模式;(b)双偏振片观测模式

Fig. 3 Observation modes. (a) Single-polarizer observation mode; (b) dual-polarizer observation mode

在系统前加垂直于透偏方向的偏振片 P1,为单偏振片观测模式;在单偏振片工作模式的基础上加上可旋转偏振片 P2,即为双偏振片观测模式,如图 3(b)所示。搭建的中波红外偏振系统原理样机如图 4 所示。



图 4 中红外偏振探测系统原理样机

Fig. 4 Principle prototype of mid-infrared polarization detection system

#### 4 实验结果分析与讨论

针对上述两种偏振工作模式,选取晴天天气条件下北京紫竹院公园内湖水域和烟台长岛海域两组太阳耀光场景进行实验,并结合相应的图像滤波算法,对抑制太阳耀光后的红外偏振图像进行目标提取,以验

证偏振工作模式对太阳耀光场景的适应能力。在远距离、近布儒斯特角探测场景下,采用单偏振片观测模式即可有效抑制太阳耀光,这是因为目标像素在图像像素中的占比较小(当目标像素在图像像素中占比小于 0.15%时,可认为是小目标<sup>[20-21]</sup>)。因此,后续采用管道滤波方法在图像中提取目标。在近距离、近水平观测角探测场景下,采用双偏振片观测模式,偏振片 2 选取一定的旋转角度,以便在消除太阳耀光 s 波分量的同时抑制 p 波分量。由于目标像素在图像像素中的占比较大,因此,后续采用形态学滤波在图像中提取船体目标。

##### 4.1 实验数据获取

远距离、近布儒斯特角探测场景下的实验地点为山东省长岛县,其经纬度为:北纬 37°59'21",东经 120°41'0"。探测目标为 1.2 m×0.8 m 的人造船(小船)及 2.8 m×1.5 m 的牵引木船(大船),目标沿一定方向直线运动。拍摄时间为 14:27,环境温度为 15℃,太阳高度角为 25.8°。由于探测地点限制,无法找到与太阳高度角呈对称镜面反射的观测角度,故选取仪器拍摄角度为 12.6°。探测距离接近 1000 m,图 5(a)为实验场景图。

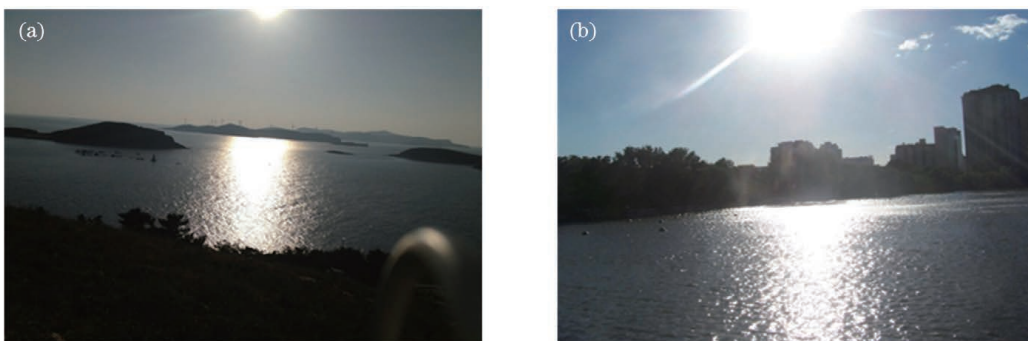


图 5 实验场景图。(a)远距离、近布儒斯特角实验场景图;(b)近距离、近水平观测角实验场景图

Fig. 5 Experimental scene images. (a) Experimental scene of long-distance with near Brewster observation angle; (b) experimental scene of short-distance with approximate horizontal observation angle

近距离、近水平观测角探测场景的实验地点为北京紫竹院公园,其经纬度为:北纬 39°59',东经 116°16'。探测目标为 1.2 m×0.8 m 的人造船,探测距离为 50 m,拍摄时间为 16:00,环境温度为 21°,太阳高度角为 20°,方位角为 245°,仪器拍摄角度为 5°。场景如图 5(b)所示。

对比度是表征图像抑制效果的一个重要指标。对比度<sup>[22]</sup>的计算公式为

$$C = \left| \frac{L_{tg} - L_{bg}}{L_{tg} + L_{bg}} \right|, \quad (12)$$

$$C^{polar} = \left| \frac{L_{tg}^{polar} - L_{bg}^{polar}}{L_{tg}^{polar} + L_{bg}^{polar}} \right|, \quad (13)$$

式中： $C$  为目标相对背景的对比度； $C^{polar}$  为偏振图像的对比度； $L_{tg}^{polar}$  和  $L_{bg}^{polar}$  分别为目标与背景的偏振辐射。在原始图像、单偏振片观测模式图像以及双偏振片观测模式图像中，分别选取目标与背景感兴趣区域 (ROI)，计算目标的相对对比度，进而评价单偏振片观测模式和双偏振片观测模式对太阳耀光的抑制效果。

## 4.2 实验结果分析

### 4.2.1 远距离、近布儒斯特角探测场景分析

图 6(a) 为未加偏振片时的中波红外图像，可以看出，太阳耀光的强烈辐射使得探测器饱和，无法探测目标。图 6(b) 为单偏振片观测模式下的红外图像，图 6(c) 为双偏振片观测模式下的图像。大船和小船目标的整体对比度实验结果如表 2 所示。

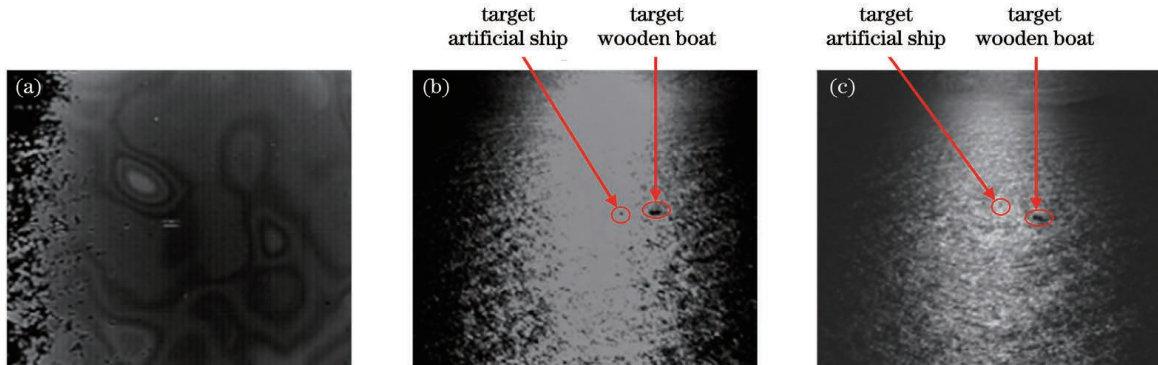


图 6 观测图像。(a) 未加偏振片时的红外图像；(b) 单偏振片观测模式下的红外图像；(c) 双偏振片观测模式下的红外图像  
Fig. 6 Observation images. (a) Infrared image without polarizer; (b) infrared image with single-polarizer observation mode; (c) infrared image with dual-polarizer observation mode

表 2 远距离、近布儒斯特角探测场景下的实验结果

Table 2 Experimental results of long-distance detection scene with near Brewster angle

Target	Image contrast		
	Without polarizer	Single-polarizer mode	Dual-polarizer mode
Wooden boat (big)	0.12	0.63	0.65
Artificial boat (small)	0.08	0.61	0.18

如图 6(b) 所示，采用单偏振片观测模式对远距离复杂海面杂波下的太阳耀光进行抑制可以有效凸显被遮蔽的目标。由偏振图像可以看出，太阳耀光大部分被抑制，大船目标轮廓清晰可见，人造小船目标所占像素较少，但对比度增强比较明显。图 6(c) 是采用双偏振片探测模式获取的图像。由于观测角度是非严格的布儒斯特角，因此太阳耀光中的 p 波分量存在，此时采用双偏振片模式进行观测，大船的对比度得以提高。但由于风浪导致海面起伏，人造小船周围出现了多个杂波亮点，使得小船目标的对比度没有提升。因此，在远距离、近布儒斯特角场景

下探测太阳耀光背景下的目标时，宜采用单偏振片模式，船体可在太阳耀光背景中凸显出来，后续再采用管道滤波<sup>[23]</sup>对图像进行处理，即可实现小目标的提取。

目标提取算法简述如下：1) 噪声剔除；2) 确定图像的 ROI 区域；3) 背景滤波；4) 基于管道滤波进行小目标提取。对一帧图像中的所有可疑目标点进行标记，在后续图像中对所有候选目标进行判定，当某一候选目标被判定为真实目标的次数超过所设阈值时即认为该候选目标为真实目标。图 7 为管道滤波后的结果图。

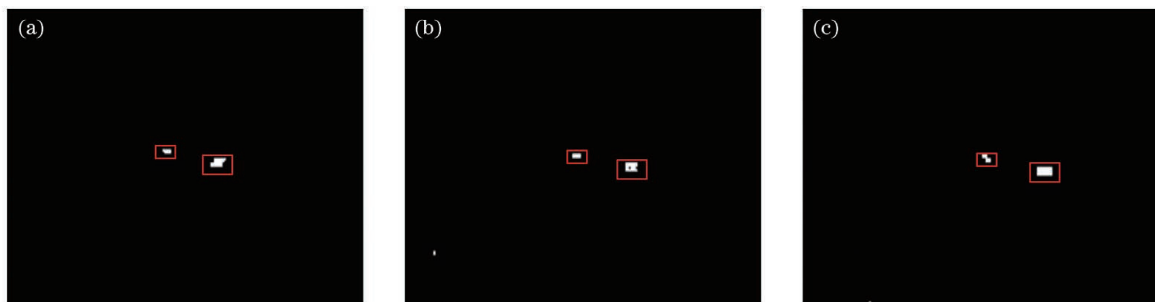


图 7 管道滤波后的结果  
Fig. 7 Result after pipeline filtering

## 4.2.2 近距离、近水平观测角探测场景分析

在此场景下,视场内的太阳耀光辐射较强,探测器接近饱和,中波红外图像如图 8(a)所示,太阳耀光背景区域内一片白亮,目标被完全覆盖。采用单偏振片观测模式获取的图像如图 8(b)所示,视场中消除了大部分太阳耀光,但残留辐射仍会淹没目标,无法用常用的目标检测算法对目标进行提取。采用双偏振片模式

可以进一步抑制海面太阳耀光辐射中的 p 波分量,提高目标在图像中的相对对比度。双偏振片工作模式获取的图像如图 8(c)所示。由于单偏振片模式观测图像被太阳耀光背景覆盖,探测器仍处于饱和状态,因此在计算对比度时,通过记录双偏振片模式图像中目标的坐标位置,在单片观测图像中选取同样的位置进行对比度计算。目标的相对对比度如表 3 所示。

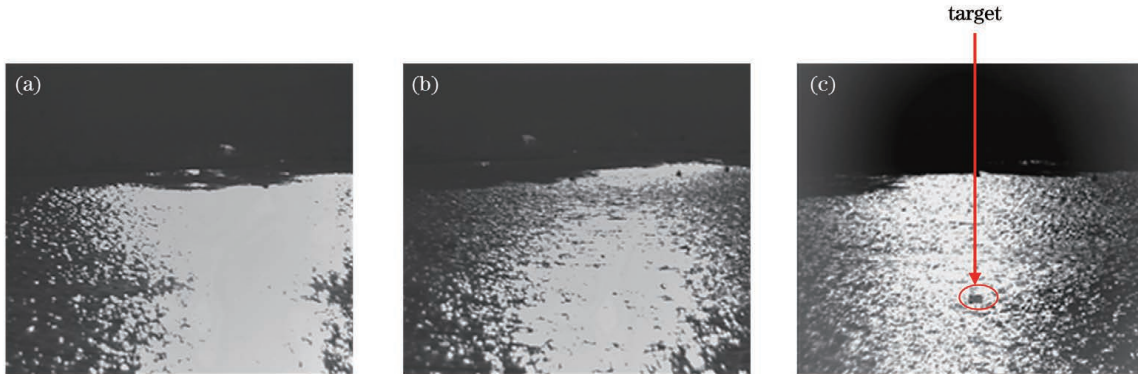


图 8 观测图像。(a) 未加偏振片时的红外图像;(b)单偏振片观测模式下的红外图像;(c)双偏振片观测模式下的红外图像

Fig. 8 Observation images. (a) Infrared image without polarizer; (b) infrared image with single-polarizer mode; (c) infrared image with dual-polarizer mode

表 3 近距离、近水平观测角探测场景下的实验结果

Table 3 Experimental result in short-distance scene with approximate horizontal observation angle

Target	Image contrast		
	Without polarizer	Single-polarizer mode	Dual-polarizer mode
Artificial boat	0.09	0.15	0.68

考虑到近距离观测条件下太阳耀光辐射过于强烈,因此采用双偏振片观测模式进行太阳耀光的抑制。根据前期理论分析<sup>[19]</sup>,不同观测场景下的最佳角度有所差异。在本应用场景下,太阳高度角为  $20^\circ$ ,方位角为  $245^\circ$ ,仪器俯角为  $5^\circ$ 。旋转偏振片 2,计算不同夹角下目标区域的相对对比度,计算结果如表 3 所示。当两偏振片夹角  $\theta_p$  为  $45^\circ$  时,目标区域的相对对比度最大,与文献计算结果吻合。使用两片偏振片后,太阳耀光辐射被大大削弱,目标的相对对比度由使用单片偏振片时的 0.15 增大到 0.68。因此,在近距离、近水平场景下进行太阳耀光下的目标探测时,宜采用双偏振片模式对目标进行提取。对于同一场景下太阳耀光随时间变化的情况,此时理论计算得到的最佳角度可能会发生变化。在此情况下,可快速旋转偏振片 2 至不同角度,遍历计算不同角度下目标的对比度,即可实现快速调节。

在获取对比度较高的偏振图像之后,采用边缘提取与形态学滤波相结合的方法<sup>[24]</sup>对目标进行处理。简要步骤为:1)噪声剔除;2)边缘提取,获取目标的轮廓信息;3)区域分割,将目标区域标记出来;4)形态学处理,消除图像中的背景杂波区域。图 9 为目标提取结果<sup>[19]</sup>。

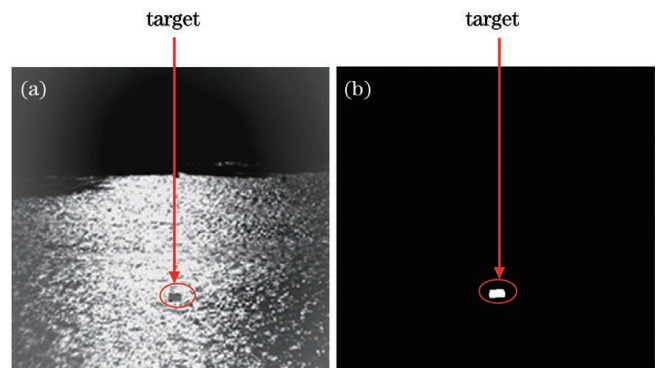


图 9 图像处理结果图。(a)双偏振片模式下最佳角度的偏振图;(b)形态学滤波处理结果

Fig. 9 Processed images. (a) Polarized image in optimal angle and dual-polarizer mode; (b) morphological filtering result

## 5 结 论

本团队在研究海面背景太阳耀光偏振特性的基础上,利用偏振探测技术,设计了单/双偏振片可切换的中红外探测系统,并基于太阳耀光辐射能量的大小制定了两种偏振工作模式,对不同场景下的太阳耀光进行抑制。单偏振片观测模式主要抑制太阳耀光中的 s

波分量,双偏振片观测模式在抑制s波分量的同时,还能抑制可能继续导致探测器饱和的p波分量。对偏振抑制后的图像进行滤波处理,最终实现了太阳耀光背景下舰船目标的有效探测。所设计的中红外偏振探测系统的单/双偏振片工作模式可以随时切换,具有良好的场景适应性。

野外实验结果表明:在远距离、近布儒斯特角的太阳耀光场景下进行探测实验时,中波红外图像、单偏振片观测模式获取的图像、双偏振片观测模式获取的图像上牵引木船的相对对比度分别为0.12、0.63、0.65;对于人造小船目标,单偏振片模式下获得的图像中的目标相对对比度为0.61,双偏振片模式下由于风浪导致目标周围出现了杂波亮点,目标的相对对比度下降到0.18。采用单偏振片工作模式对远距离、近布儒斯特角场景下的太阳耀光进行抑制后即可有效探测目标。在近距离、近水平观测条件下的太阳耀光抑制实验中,采用双偏振片模式,通过旋转第二片偏振片寻找此场景下的最佳角度,可将目标的相对对比度由单偏振片模式下的0.15提升到0.68。在此场景下,采用双偏振片模式能更有效地探测目标。

本文所提两种偏振工作模式可以解决大部分场景下太阳耀光的抑制问题,有效提升偏振系统在太阳耀光场景下的探测能力。在下一步工作中,拟针对 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内的任意太阳高度角,利用所研制的偏振探测系统对太阳耀光区域内的船体目标进行探测,以验证偏振探测对海面太阳耀光的抑制作用,提升目标的探测能力。

### 参 考 文 献

- [1] 罗杨洁, 赵云升, 胡新礼, 等. 偏振与多角度遥感中的太阳耀光剥离[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 205-208.  
Luo Y J, Zhao Y S, Hu X L, et al. Polarization and sun glitter's peeling-off of multi-angle remote sensing[J]. Optical Technique, 2006, 32(2): 205-208.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Cooper A, Crittenden E, Jr, Milne E. Mid-and far-infrared measurements of sun glint from the sea surface[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1749: 176-185.
- [5] Gregoris D, Yu S, Cooper A, et al. Dual-band infrared polarization measurements of sun glint from the sea surface[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1687: 381-391.
- [6] 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.
- [7] Fougne 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.
- [8] Cremer F, Schwering P B W, de Jong W, et al. Infrared polarization measurements of targets and backgrounds in a marine environment[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4370: 169-180.
- [9] 邓宇, 付强, 张肃, 等. 基于偏振检测技术的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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Tuo H N, Shi G C, Luo X L. Infrared polarization image fusion and detection system for ship target[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1802(2): 022070.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Shaw J, Descour M, Sabatke D, et al. Measurements of midwave and longwave infrared polarization from water[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3754: 118-125.
- [18] Shaw J, Marston C. Polarized infrared emissivity for a rough water surface[J]. Optics Express, 2000, 7(11): 375-380.
- [19] 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.
- [20] Mao X, Diao W H. Criterion to evaluate the quality of infrared small target images[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(1): 56-64.
- [21] Yonovitz D. Tunable wavelet target extraction preprocessor[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6569: 65690A.
- [22] 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.  
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.
- [23] 连可, 王厚军, 李丹. 基于红外目标局部灰度特性分析的管道滤波方法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 200-203, 206.  
Lian K, Wang H J, Li D. Pipeline filtering method based on feature analysis of local grey level of small infrared target[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011,

31(4): 200-203, 206.

- [24] 过润秋, 张颖, 林晓春. 基于形态滤波的红外小目标检测方法[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 451-453.

Guo R Q, Zhang Y, Lin X C. A new method of infrared dim small targets detection by morphology filtering [J]. Laser & Infrared, 2005, 35(6): 451-453.

## Detection of Marine Targets Covered in Sun Glint Based on Mid-infrared Polarization

Li Yansong<sup>1</sup>, Zhao Huijie<sup>1,2</sup>, Li Na<sup>1,2\*</sup>, Jia Guorui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, School of Instrumentation & Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup> Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China

### Abstract

**Objective** When marine targets on the sea surface are detected or continuously monitored using mid-infrared sensors, the results are negatively impacted by the radiance due to sun glint, which can cause the sensors to be saturated and target signals to be obscured. Polarization detection technology has been relied upon in the past to solve this problem owing to the polarization properties of sun glint. The traditional single-polarizer system for suppressing sun glint depends on the geometric position of the sun and the sensor. The system can only be successfully applied when the polarization degree of sun glint is obvious or when the sun glint is not strong. In certain situations, the residual sun-glint radiance is greater than the sensor-saturation response. In contrast, the dual-polarizer system, in which the polarizer has a fixed direction, achieves good contrast enhancement; the scenario applicability, however, is still limited. Furthermore, the polarization directional reflectance tends to vary across different observation scenes, which restricts the scope of the aforementioned methods. Therefore, to solve the original problem, in this study, based on the analysis of the mid-infrared polarization properties of sun glint on the sea surface, a mid-infrared switchable dual-polarizer detection system is designed. For different detection scenes, two work modes, both combined with an image-processing algorithm, are selected to realize the extraction of ship targets covered in sun glint.

**Methods** In this study, to deal with a variety of sun-glint scenes, a mid-infrared switchable dual-polarizer detection system (Fig. 2) that can simultaneously suppress the s- and p-polarized components of sun glint is proposed (Fig. 3). Polarizer 1 was placed in front of the sensor and polarizer 2 on the rotatable support. A single-polarizer was used when the rotatable support was empty. We established whether one or two polarizers should be used based on the type and amount of sun glint, and accordingly named the scenarios as single-polarizer mode and dual-polarizer mode, respectively. The amount of sun-glint radiance can be calculated theoretically using Cox and Munk's "slope" probability model and Fresnel's law. The polarized type of sun-glint radiance is related to the sea surface conditions of the sensor points, the observation geometric conditions, and the atmospheric transmittance of the path. The degree of polarization of sun glint is always positive in the mid-infrared wavelength band and it reaches a maximum of 100% as the observation angle approaches the Brewster angle. At this stage, the sun glint is dominated by the s-polarized component, which can be suppressed through the single-polarizer mode. However, a p-polarized component exists in sun glint in most viewing cases, and the intensities of the p- and s-polarized components are nearly equal to the approximate horizontal observation angle. At this stage, a dual-polarizer was utilized to suppress the residual p-polarized component. Because the working mode of single/dual-polarizers can switch flexibly, the proposed polarization detection system can significantly reduce sun glint and enhance the contrast of target images for a variety of sun-glint scenes.

**Results and Discussions** Two groups of sun-glint scenes in "the lake in Zizhuyuan" and "the off shore in Changdao, Yantai city" are selected for experiments, so as to clarify the scene adaptability under different polarization working modes.

The image obtained through the single-polarizer mode can effectively highlight the obscured target (a big boat with size  $2.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$  and a small boat with size  $1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ); a similar contrast enhancement occurs in the dual-polarizer mode (Fig. 6). For the small-boat target, the relative contrast in the single-polarizer mode is 0.61, but clutter bright spots appear around the target owing to the effect of wind and waves in the dual-polarizer mode, and the relative contrast drops to 0.18 (Table 2). Therefore, for long-distance near Brewster angle detection of small targets, the single-polarizer mode should be adopted. The dual-polarizer mode is adopted to further suppress the p-polarized component for a short distance with an approximate horizontal observation angle to improve the relative contrast of the target (Fig. 8).



Compared with the single-polarizer mode, the relative contrast of the target is increased from 0.15 to 0.68 (Table 3). For the best angle of the two polarizers, the sun-glint radiance can be calculated according to MODTRAN and Cox and Munk's models; the theoretical calculation can subsequently be carried out by comparing the contrast function.

**Conclusions** Based on the polarization properties of sun glint on the sea surface, a switchable mid-infrared detection system is proposed for a variety of detection scenes. Two polarization working modes are formulated to suppress the sun glint by calculating the polarized type and amount of sun-glint radiance. The single-polarizer mode is utilized when the s-polarized component dominates, whereas the dual-polarizer mode is used when the residual p-polarized component is greater than the sensor-saturation response after single-polarizer suppression. The suppressed image is then processed to realize effective ship target detection in sun glint. Therefore, the proposed mid-infrared dual-polarization detection system can significantly enhance the contrast of target images and effectively improve the detection ability for various sun-glint scenes.

**Key words** detector; polarization imaging; sun glint; mid-infrared polarization detection; target detection