

## 海面背景耀光的自适应抑制系统

朱鹤骞<sup>1,2</sup>, 曲宏松<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 太阳光通过海面的镜面反射形成耀光,但其较强的光强会造成常规探测成像饱和,严重影响对海面目标的探测。基于海面耀光的偏振特性以及数字域时间延时积分互补金属氧化物半导体(TDI-CMOS)的积分特性,设计并构建了一套海面目标自适应偏振探测系统。利用该系统通过偏振相机对海面目标进行实时成像偏振测量,引导数字域 TDI-CMOS 相机在时域与空域两个维度上对耀光进行抑制。搭建了水面观测实验平台,针对典型目标,开展了相关的验证实验。实验结果表明:使用所构建的探测系统能够有效抑制太阳耀光对图像的影响,并且获取的耀光抑制图像相比一般图像,信杂比提升显著,该系统有效改善了运动目标对图像造成的伪影现象,针对海面目标的探测效果得到有效改善。

**关键词** 遥感; 偏振探测; 时间延时积分; 互补氧化物半导体; 耀光

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1201006

## Adaptive Suppression System of Sea Background Flare

Zhu Heqian<sup>1,2</sup>, Qu Hongsong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The mirror reflection of sunlight by the sea surface forms flares. However, conventional detection imaging is prone to be saturated due to their high light intensity, which seriously affects the detection of sea-surface targets. Depending on the polarization characteristics of sea surface flares and the integral characteristics of a time-delay-integration complementary metal oxide semiconductor (TDI-CMOS) in the digital domain, this paper designs and constructs an adaptive polarization detection system for sea-surface targets. With the help of this system, the polarization characteristics of sea-surface targets can be obtained by imaging them with a polarization camera in real time. The system guides the TDI-CMOS camera in the digital domain to suppress flares in time and space domains. In this paper, an experimental platform is built for water surface observation, and relevant validation experiments are carried out for typical targets. The experimental results show that the detection system can effectively suppress the influence of solar flares on images. Compared with ordinary images, the obtained flare suppression images have a significantly enhanced signal-to-clutter ratio, which effectively improves the artifacts caused by moving targets on images and greatly facilitates the detection of sea-surface targets.

**Key words** remote sensing; polarization detection; time delay integration; complementary oxide semiconductor; flare

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2021-12-04; 录用日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(62075219, 61805244)、吉林省重点科技研发计划项目(20190303094SF)

通信作者: \*quhongsong@ciomp.ac.cn

## 1 引言

我国海域辽阔,对海洋资源的调查开发、海上目标的监测等一直是国家战略的重点之一。然而,虽然海面上的目标在广阔均一的背景下可能更易被察觉和探测,但是传统的光学遥感对海洋目标进行探测时会受到太阳耀光的影响,而且在受影响的中心区域,太阳耀光的强度非常大,容易使传统的光学探测器获取的图像出现饱和失真,从而严重影响对海面目标的探测<sup>[1-3]</sup>。潘德炉等通过对 FY-1-02 批卫星图像的研究发现,有 20%~25% 的图像区域存在太阳耀光,导致所获得的图像无法用于目标探测<sup>[4]</sup>。而相关研究均表明:经海面反射的太阳光形成的太阳耀光具有明显的偏振特征<sup>[5-6]</sup>,吕云峰<sup>[7]</sup>在研究水体的偏振特性时也指出海水表面的偏振特性与光源的入射状态、探测器的观测状态等有着直接的关系,但与波长的关联性不大。Cooper 等<sup>[8-9]</sup>的研究均表明,海上目标与背景海面在偏振特性上存在显著差异,使用偏振测量能够明显提高船只与海面的对比度,并且针对海洋目标引入偏振探测能够更好地获取目标状态,减小太阳耀光的影响<sup>[10-11]</sup>。

在偏振成像系统中,偏振器件中光的传输方向垂直于海面反射的太阳耀光主偏振方向,其可以有效地抑制海面太阳耀光<sup>[12-13]</sup>。Zhao 等<sup>[14]</sup>利用双角度可调偏振器的红外偏振成像系统进一步抑制太阳耀光。虽然该技术取得了很好的效果,但难以适用于目标与背景偏振特性差异较小的情况。Liang 等<sup>[15]</sup>提出了一种图像处理算法与偏振成像技术相结合的耀光抑制方法,该方法利用耀光偏振分量和的强度,采用 RX 异常检测算法提取杂波信息,通过图像滤波算法抑制耀光;在此基础上提出了将偏振成像技术与一维时域处理算法相结合的算法,由此获得了一种更有效的太阳耀光抑制方法<sup>[16]</sup>。但这些方法均局限于仅发现目标,用这些方法对运动中的目标进行探测,得到的图像背景中出现伪影,这些方法难以针对具有一定相对速度的目标细节进行探测。

针对海面耀光对图像的影响,以及一般偏振方法难以去除相对运动造成的图像伪影问题,本文对海面耀光的特性进行研究,并根据数字域 TDI-CMOS 的成像特性,设计了一种能够实时抑制自适应海面反射光偏振状态的时域空域海面耀光的偏振装置,并改进了相应的偏振抑制耀光的算法。

## 2 海面耀光抑制方法

### 2.1 探测器接收到的太阳耀光能量

一般情况下,同一海面区域会表现出不断起伏变化的现象,每一局部区域也均满足光的反射定律,海面的起伏不定造成了在探测器区域存在多处耀光区域,原理图如图 1 所示。

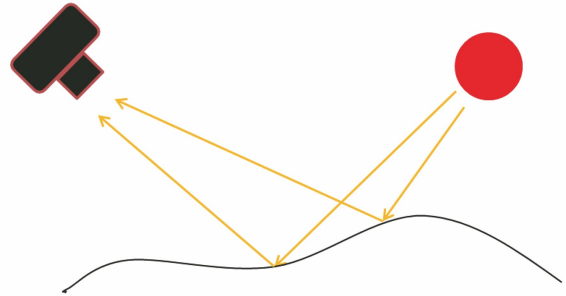


图 1 产生多处耀光的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of generating multiple flare

若将整个海平面视作一个平面的话,探测器只会得到太阳光经镜面反射的耀光区域,耀光区域为规则的圆形。但现实中的海面是起伏不定的,如图 1 所示,所获得的阳光区域可能不止一个,而耀光区域的大小与耀光的密度是有一定规律可循的,如上面所作的假设相同,在实际粗糙海况、太阳光的入射角一定且探测器的接收角度为平静海面的反射角的情况下,所获得的耀光斑点密度最大。但粗糙海面是由一个个的微小面元组成,这些微小面元的法线方向各不相同,造成了耀光密度会随着探测角度以及海面波浪场的变化而变化,而这些微小面元的起伏状态和不同倾角方向出现的概率可以由 Cox-Munk 的统计学模型解释<sup>[17]</sup>,Cox-Munk 认为海面呈现的粗糙程度可以认为是由许多取向不同的小波面构成,微小波面的示意图如图 2 所示。

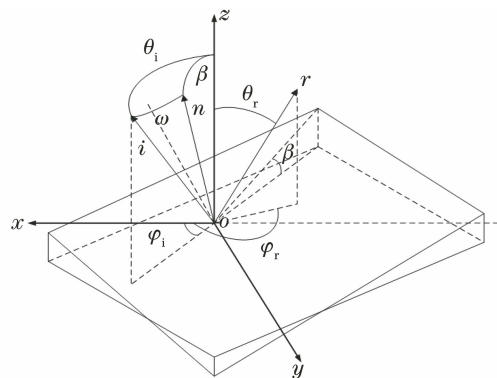


图 2 Cox-Munk 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Cox-Munk model

$$\rho_1(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda) = \frac{\rho(\omega) p(S_x, S_y, \sigma) \sec^4 \beta}{4 \cos \theta_r \cos \theta_i}, \quad (1)$$

$$p(S_x, S_y, \sigma) = (\pi \sigma^2)^{-1} \exp\left(-\frac{S_x + S_y}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.00512\omega, \quad (3)$$

式中:  $S_x$  和  $S_y$  分别为微小波面在  $x$ 、 $y$  方向的斜率;  $\sigma$  为海面的粗糙度;  $\omega$  为高度距海天分界处 12.5 m 位置的风速, 单位为 m/s;  $\rho(\omega)$  为粗糙海面的菲涅耳反射率;  $p(S_x, S_y, \sigma)$  为微面元斜率满足的概率分布函数;  $\beta$  为微面元的斜率, 即  $z$  轴和倾斜小面元法线之间的夹角;  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别为入射与反射光线的天顶角。假设太阳光照射到海面处的辐亮度为  $L_{\text{sun}}$ , 则经海面反射以及大气衰减, 最后由探测器接收到的海面反射的辐亮度为

$$L = L_{\text{sun}} \rho_1(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r, \lambda) \tau(\lambda, s), \quad (4)$$

式中:  $s$  代表探测目标到探测器的距离;  $\tau(\lambda, s)$  为大气的光谱透过率, 其与散射系数  $u(\lambda)$  之间的关系可由比尔-朗伯定律得到:

$$\tau(\lambda, s) = \exp[-u(\lambda)s]. \quad (5)$$

最后通过式(4)得到不同入射条件下, 探测器在不同观测方位时接收到的辐亮度。但由于探测器接收到的能量不仅局限于海面反射的能量, 还包括大气粒子自身的一次辐射以及天空多次散射等进入探测器的能量, 本文通过四方向偏振相机测定进入探测器光线的偏振信息。

## 2.2 空域海面耀光抑制

由菲涅耳公式可知, 太阳光经过海面反射后一般为部分偏振光, 可以看作线偏振光和完全非偏振光的一种叠加:

$$I = I_p + I_u, \quad (6)$$

式中:  $I_p$  为完全偏振光的强度;  $I_u$  为自然光的强度。光的偏振态可由斯托克斯矢量描述, 斯托克斯矢量由 4 个涵盖了光的全部偏振特性的元素组

成<sup>[18]</sup>。斯托克斯矢量通常被描述为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_L - I_R \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $I_{0^\circ}$ 、 $I_{45^\circ}$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_{135^\circ}$  分别代表与参考方向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的线偏振强度(以  $0^\circ$  线偏振强度  $I_{0^\circ}$  的偏振方向为参考方向);  $I_L$ 、 $I_R$  表示左、右旋圆偏振强度;  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为完整表示光的偏振特性的 4 个参量。当没有任何偏振信息的太阳光入射到海面时, 根据菲涅耳公式, 海面改变入射光的偏振状态并以部分偏振光的形式反射出去, 此时反射光的偏振态主要集中在偏振成分上, 产生的圆偏振效应很小, 所以通常不考虑  $S_3$  分量。通过斯托克斯公式可以计算出偏振度( $D_{\text{OP}}$ )和偏振角( $A_{\text{OP}}$ )信息:

$$D_{\text{OP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (8)$$

$$A_{\text{OP}} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (9)$$

本文使用四方向偏光镜的偏振相机, 相机的每个像元上均有  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  4 个不同方向的像元级偏振滤光镜, 其严格对应斯托克斯公式中的  $I_{0^\circ}$ 、 $I_{45^\circ}$ 、 $I_{90^\circ}$ 、 $I_{135^\circ}$ , 获得  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  4 个偏振方向的图像。将 4 幅图像同一像素点的灰度值代入式(7), 获得每一像素位置的  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  参量, 并将所得到的斯托克斯参量代入到式(9)中, 即可求得整幅图像去除饱和像素点的平均偏振度  $D_{\text{OP}}$  和偏振角  $A_{\text{OP}}$ , 由此计算出海面反射偏振光的主要偏振方向, 通过调整相机物镜前的偏振滤光片的角度, 使其与计算所得的偏振角垂直, 从整体层面上降低海面耀光与背景的光强, 探测器接收的光强可降为海面反射的部分偏振光强度的一半以下, 即实现空域对海面耀光的抑制, 相机获取的光强最低的示意图如图 3 所示。

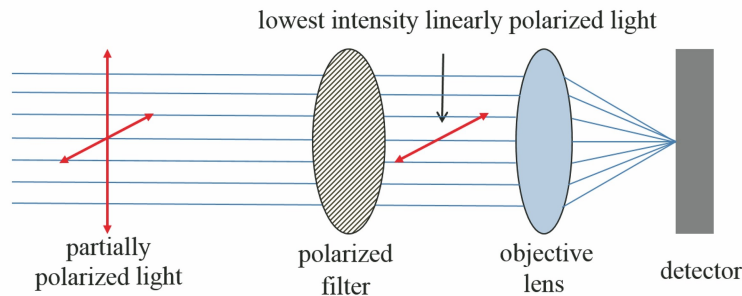


图 3 探测器获取光强最低的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of obtaining lowest intensity by detector

### 2.3 时域海面耀光抑制

海面并非理想水平面,会产生局部随机的起伏波动,同一海面位置上太阳耀光的强度特征也会随着时间产生波动。在一段时间内,同一区域的海面上的每一小块区域会在是否存在耀光的状态之间往复变化。利用这一特性,即可在单幅图像抑制耀光的基础上,获得在时域上对海面耀光进行抑制的图像。

通过对同一位置的目标以及耀光区域连续拍摄,得到一组图像序列,序列中每幅图像耀光的闪烁状态均有所变化,将这些图像进行时域融合来达到抑制耀光的目的。通过将每幅图像同一位置的像素灰度值进行比较,将图像序列中对应每一像素位置的最小灰度值提取出来,并赋值给最终的图像,以进一步降低饱和像素数量和整体光强,达到抑制海面耀光的目的。最终图像的每个像素的值为

$$\mathbf{F}(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,n) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m,1) & f(m,2) & \cdots & f(m,n) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $\mathbf{F}(x, y)$ 为最终图像; $f(m, n)$ 为探测器第  $m$  行、第  $n$  列的像元对应的最终图像像素点的灰度值,并且灰度值的大小由多幅图像对应像素点的最小值赋给。

### 2.4 抑制图像伪影的改进方法

针对海面的运动目标,一般的相机在进行连续拍摄时,若曝光时间过长,将获取的多幅图像叠加虽然可以有效地抑制海面耀光,但很容易出现伪影现象,若连续曝光的时间过短,图像又会出现整体偏暗,两种情况均会对目标的探测产生影响。TDI 技术可以通过对同一列像素信号进行多次延时累加,拥有快速扫描的条件,获取的图像对比度、信噪比远高于一般相机,且单位时间内获取的有效光强大于普通相机,能够有效地降低伪影对图像造成的影响。

将两种 TDI 成像系统进行比对,TDI-CCD 只能单向扫描图像信息,不能随机读取;TDI-CMOS 实现图像 TDI 位于链路后端,操作灵活,便于集成图像处理,而且 CMOS 图像传感器的功耗低、工艺成本低,芯片的集成度高,成像速度快<sup>[19]</sup>,具备本文的机载快速拍摄要求,以及拍摄过程中对图像进行处理的功能,于是选取数字域 TDI-CMOS 相机全局曝光方式进行拍摄。数字域 TDI-CMOS 全局曝光

示意图如图 4 所示。

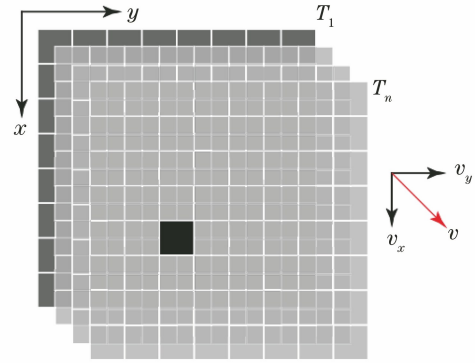


图 4 数字域 TDI-CMOS 全局曝光示意图

Fig. 4 Schematic diagram of global exposure of TDI-CMOS in digital domain

图 4 中黑色区域为海上的运动目标,且其在每一积分周期内所显示图像中的位置略有不同, $v$  为目标速度,根据目标速度  $v$  和每一级的曝光时间,计算出目标移动像元数,以此达到配准的目的,获得目标在多幅图像中同一位置的一组图像。假设 CMOS 器件的像元数为  $j \times k$ ,行转移时间为  $T_f$ ,每一像素点大小对应图像实际大小的倍率为  $\Gamma$ ,其与具体光学系统的焦距以及焦面与目标之间的距离有关。探测器像元移动量  $S$  与运动目标速度之间的关系满足

$$\begin{cases} U_x = \frac{v_x T_f}{\Gamma} \\ U_y = \frac{v_y T_f}{\Gamma} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $v_x$  与  $v_y$  分别为图 4 中目标速度  $v$  的  $x$  与  $y$  方向的分量; $U_x$  与  $U_y$  为目标在相邻两帧图像中像元的偏移量。由于目标的移动量反映在像元上难以以整个像元为单位,常会出现计算所得的移动量为不完整的一个像元,这里主要通过调整行转移时间对其进行修正。

本文算法通过对累加器进行更改,并不直接输出每一帧图像在一个积分周期内对应的电压信号,而是先将其放置在缓存区域,通过更改每一级的曝光时间使积分级数与曝光时间的乘积相同,从而使获得的每一组完整的图像总体曝光时间相同。将每一帧相同像素点位置的像素值进行比对,将一组图像中同一位置的最小像素值赋给最终图像并将其累加  $N$  次后输出( $N$  即为积分级数),等同于将较短的曝光时间扩大了  $N$  倍。通过对应用于一般相机的抑制耀光的公式[式(10)]进行改进,使之适用于数字域 TDI-CMOS;

$$\mathbf{F}(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,n) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(m,1) & f(m,2) & \cdots & f(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^M f_i(1,1)}{M} - N & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(1,2)}{M} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(1,n)}{M} - N \\ \frac{\sum_{i=1}^M f_i(2,1)}{M} - N & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(2,2)}{M} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(2,n)}{M} - N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^M f_i(m,1)}{M} - N & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(m,2)}{M} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^M f_i(m,n)}{M} - N \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $M$  为  $N$  帧图像同一位置去除饱和像素点后所剩余的像素点个数(若  $N$  帧图像同一位置像素点均饱和, 则保留其像素值);  $f_i(m, n)$  为第  $i$  帧图像探测器的像元坐标  $(m, n)$  位置的像素值大小。

虽然此算法应用的是数字域 TDI-CMOS 的多级曝光功能, 但是类似于单级曝光的应用, 因存在帧数减少导致的信噪比降低的问题, 本文对此算法进行了优化, 在去除饱和和像素点的基础上, 将与平均灰度值差距较大的像素点也一一去除, 则有

$$f_j(x, y) = \left| f_i(x, y) - \frac{\sum_{i=1}^M f_i(x, y)}{M} - N \right|. \quad (13)$$

若  $f_j(m, n)$  超过像素点平均灰度的 30%, 便可认为该像素值无效, 设将其去除后的同一位置的有效像素点个数为  $P$ , 由此即可获得饱和和像素少、信噪比高的最终图像, 得到的图像为

$$\mathbf{F}(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \cdots & f(1,n) \\ f(2,1) & f(2,2) & \cdots & f(2,n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(m,1) & f(m,2) & \cdots & f(m,n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^P f_i(1,1)}{P} - N & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(1,2)}{P} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(1,n)}{P} - N \\ \frac{\sum_{i=1}^P f_i(2,1)}{P} - N & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(2,2)}{P} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(2,n)}{P} - N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^P f_i(m,1)}{P} - N & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(m,2)}{P} - N & \cdots & \frac{\sum_{i=1}^P f_i(m,n)}{P} - N \end{bmatrix}. \quad (14)$$

### 3 海面目标自适应偏振探测装置的功能和组成

#### 3.1 海面目标自适应偏振探测装置的功能

海面目标自适应偏振探测装置主要具有以下功能: 1) 具备实时采集偏振图像并于计算机上显示, 以及对偏振图像进行分析及处理的功能; 2) 具备对光的强度、偏振度及偏振角计算处理的功能; 3) 具备通过实时调节偏振滤光镜对海面反射光进行调制的功能; 4) 具备对时域图像进行叠加处理的功能。

#### 3.2 海面目标自适应偏振探测装置的组成

装置整体采用偏振相机引导数字域 TDI-CMOS 相机的工作方式, 根据偏振分析的结果, 实时控制数字域 TDI-CMOS 相机前的偏振片旋转角度, 通过改变其透偏方向, 使得偏振片的检偏方向与背景的偏振方向相垂直, 从而有效抑制背景辐射, 提升观测目标的探测对比度。利用数字域 TDI-CMOS 的特性与相应算法, 有效抑制对运动中的目标进行探测时出现的图像伪影问题。

海面目标自适应偏振探测装置主要由四方向偏光镜的偏振相机、数字域 TDI-CMOS 相机、偏振滤

光片、角度控制的步进电机和计算机构成。偏振相机接收海面的反射光线,得到 4 幅偏振方向分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的偏振图像,利用计算机接收偏振相机获得的图像,并将每幅图的每个像素的最小强度分配给最终图像,偏振相机通过实时对海面耀光的偏振特性进行测量,提供有效的背景抑制方向信息,并根据计算出的偏振角,通过计算机将此角度实

时发送给步进电机,用于控制偏振滤光片旋转,令偏振片的检偏方向与海面背景的主要偏振方向相垂直。

由数字域 TDI-CMOS 相机接收经过偏振滤光片的海面反射光线,通过相应算法进行几乎实时的空域与时域滤波,得到抑制海面耀光后的最终图像。海面目标自适应偏振探测装置的结构如图 5 所示。

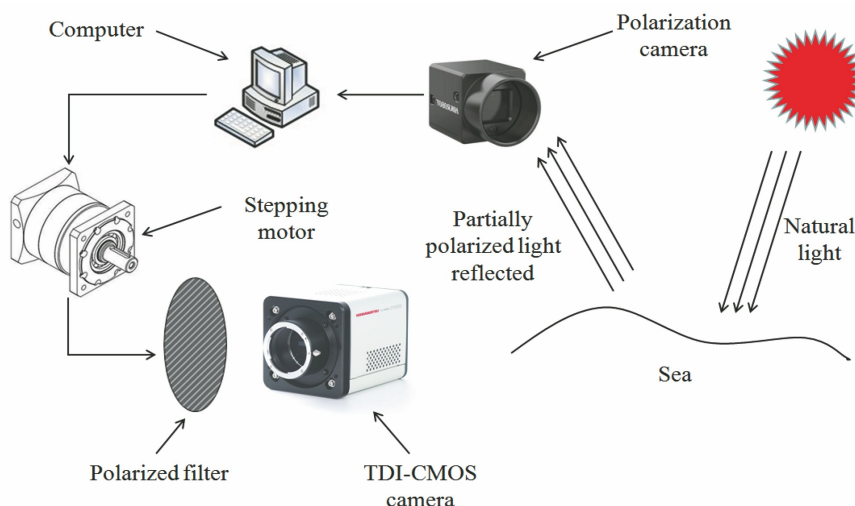


图 5 海面目标自适应偏振探测装置结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structure of adaptive polarization detection device for sea targets

## 4 实验验证

为验证该装置的有效性,本文利用海面目标自适应偏振探测装置,针对海面目标展开了对太阳耀光的抑制实验。实验中采用 Genie Nano 四方向偏振相机, Sony IMX250MZR 传感器,像元大小为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ ,相机的传感器对  $400 \sim 850 \text{ nm}$  的光谱响应度良好,同一时间可拍摄 4 幅 8 bit 的偏振图像,每幅图像的大小为  $1232 \times 1028$ 。通过计算机接收偏振相机采集的图像,并计算此时海面信息的偏振信息,以此引导电机控制偏振滤光片,使其旋转至对耀光抑制效果最佳的角度。偏振滤光片采用恒洋光学 GSP-30 型号线偏振滤光片,其在  $400 \sim 700 \text{ nm}$  波段的平均透光率为 90%,平均消光比为

1:100,通过数字域 TDI-CMOS 相机进行图像采集,完成对太阳耀光的抑制。数字域 TDI-CMOS 相机采用 Camera Link HS 光纤接口,像元数量为  $1440 \times 1080$ ,在  $300 \sim 1100 \text{ nm}$  光谱区间响应度良好,视场角为  $6.2^\circ$ ,实验中采用 2, 4, 8, 12, 16, 32, 64, 96 个积分级数。拍摄时间为 2021-10-30T10:30,拍摄地点为吉林省长春市南溪湿地公园(东经  $125.35^\circ$ ,北纬  $43.81^\circ$ )。

通过式(8)计算利用四方向偏振相机测得的图像所获得的海面反射光的偏振度约为 0.26,通过使用偏振滤光片将太阳耀光与背景海面的总体灰度值降低到单片偏振滤光镜所能实现的最低值。对比图 6 中左右两幅图像,可知使用单片偏振滤光镜可以对海面的耀光进行一定程度上的抑制。

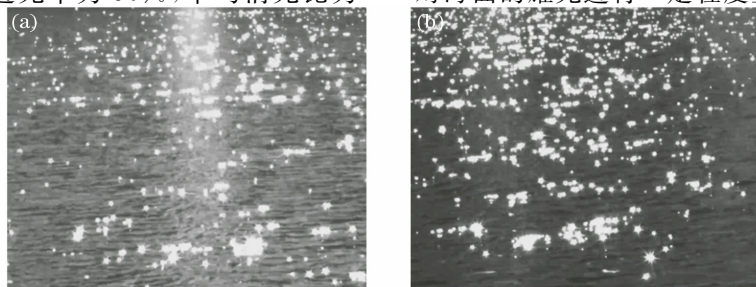


图 6 海面背景耀光图像。(a)未加偏振滤光镜;(b)加偏振滤光镜

Fig. 6 Sea background flare images. (a) Without polarization filter; (b) with polarizing filter

针对水面运动目标,进行了初步偏振抑制后由 TDI-CMOS 相机获得的单帧图像,如图 7 所示。图 7 中具有大面积的背景耀光,背景耀光对目标的探测有影响,通过自适应偏振探测对水面运动中的目标进行耀光抑制,目标与探测器之间的距离约为 10 m,控制目标的运动速度为 10 m/s,分别设定数字域 TDI-CMOS 相机的积分级数为 4,8,12,16,综合太阳光照与探测器特性,选取每帧的曝光时间为 1100,550,367,275  $\mu\text{s}$ ,对运动中的目标进行探测,结果如图 8 所示。



图 7 目标空域偏振抑制图像

Fig. 7 Target spatial polarization suppression image

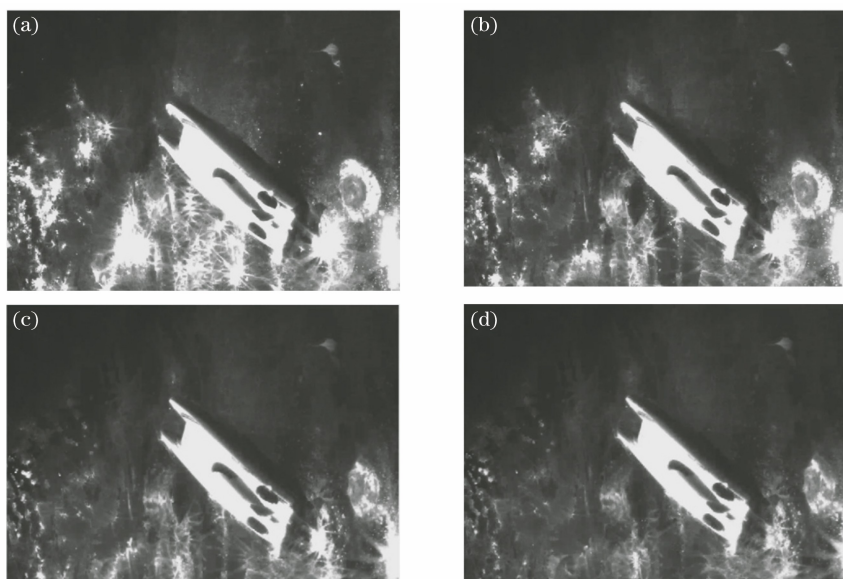


图 8 不同积分级数下的耀光抑制结果图。(a) 4 级;(b) 8 级;(c) 12 级;(d) 16 级

Fig. 8 Results of glare suppression under different integral levels. (a) 4 levels; (b) 8 levels; (c) 12 levels; (d) 16 levels

根据本文算法中积分级数与单级曝光时间的对应关系,4 幅图的总曝光时间基本相同,被探测目标的灰度在不同的积分级数中基本保持一致,通过改变不同的积分级数,即可对海面耀光和背景杂波进行有效抑制。通过像素层面的配准,获得 4 幅时空域的耀光抑制图像,从 4 幅图中可以看出:在总曝光时间相同时,积分级数越高,最终所得到的耀光抑制图像效果越好。

通过平均灰度和饱和像素点占比对图像进行评价,由于所选运动目标过亮,所含饱和像素过多,这里所用图像均为去除目标之后的海面背景图像,评价结果见表 1 和表 2。由表 1 和表 2 可知,在具有耀光背景干扰的情况下,通过偏振探测的方式能够显著抑制太阳耀光,提高目标与海洋背景之间的对比度,通过更改本文装置的积分级数,发现积分级数越高,装置对海面耀光的抑制效果越好。

表 1 饱和像素占比

Table 1 Proportion of saturated pixels

Integral	Single-level integral	Four-level integral	Eight-level integral	Twelve-level integral	Sixteen-level integral
Proportion of saturated pixels /%	15.52	6.45	3.69	1.48	0.87

表 2 图像平均灰度

Table 2 Average image gray level

Integral	Single-level integral	Four-level integral	Eight-level integral	Twelve-level integral	Sixteen-level integral
Average image gray level	110.81	78.72	66.51	57.20	51.95

实验结果表明,四方向偏振相机可引导偏振滤光片从整体层面降低光强,时域耀光抑制方法对图像耀光的抑制效果明显。通过本文设计的数字域 TDI-CMOS 成像方式以及像素级的计算配准可以大大减少目标在运动中产生的伪影。因此,采用本文设计的海面背景耀光的自适应抑制装置可以有效地抑制海面背景耀光,提升耀光背景下海面目标的显著性,并且针对运动目标可以大大降低图像中目标的伪影程度。

## 5 结 论

基于海面背景耀光的特性,针对海面目标探测时对太阳耀光背景的抑制需求,利用所设计的海面目标自适应偏振探测装置,给出了海面耀光的抑制方法并展开实验验证。结果表明:由海面反射的耀光区域存在比较明显的偏振特性,利用同时针对海面耀光进行时域与空域上的抑制能够明显降低背景耀光对海上目标的影响,并且本文对数字域 TDI-CMOS 相机的算法设计可有效减弱一般耀光抑制方法中对于海上运动目标产生的伪影现象,确保对耀光区域中运动目标的有效探测。

本文的探测装置是通过实时监测海面的偏振特性变化,来更改偏振滤光镜的旋转角度,但是当探测器的接收方向发生较大变化时,只能实现近似实时的响应。本文采用的是数字域 TDI-CMOS 相机的全局曝光模式,设计的目标配准算法是根据目标运动状态得到的,但是当目标自身姿态发生变化时,就难以做到同时保证实时性与准确性。下一步的工作是在保证装置实时性的同时,更改配准模式,以提高目标探测的精确性。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Lynch D K, Dearborn D S P, Lock J A. Glitter and glints on water[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(28): F39-F49.
- [3] Garaba S P, Zielinski O. Methods in reducing surface reflected glint for shipborne above-water remote sensing[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2013, 8: 13058.
- [4] 陈彬. 海面背景下舰船目标红外辐射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Chen B. Research on infrared radiation characteristics of naval vessel target in the sea background [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [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] 吕云峰. 水体的偏振特性研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.  
Lü Y F. The study of the polarized characteristics of water [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
- [8] Cooper A W, Lentz W J, Philip 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, Philip L, et al. Infrared polarization ship images and contrast in the MAPTIP experiment[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2828: 85-96.
- [10] 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. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sun glint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1648-1653.
- [11] 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.
- [12] Gregoris D J, Yu S K, Cooper A W, et al. Dual-band infrared polarization measurements of sun glint from the sea surface[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1687: 176-185.
- [13] de Jong A D, Schwering P, Fritz P, et al. Optical characteristics of small surface targets, measured in the False Bay, South Africa [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7300: 730003.
- [14] 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.
- [15] 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.



- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 谢建. 典型目标的红外偏振特性仿真方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
Xie J. Simulation and analysis method of infrared polarization characteristics of typical targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [19] 何春良, 李斌桥, 刘振旺, 等. TDI CMOS 图像传感器曝光时间优化方法研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0204002.  
He C L, Li B Q, Liu Z W, et al. Integration time optimization for TDI CMOS image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0204002.