第 37 卷第 6 期
2018 年 12 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 37, No. 6
December, 2018

文章编号: 1001 - 9014(2018) 06 - 0746 - 08

DOI: 10.11972/j.issn.1001 - 9014.2018.06.019

用于海面目标探测的中波红外实时偏振成像系统研究

韩平丽[1], 刘 飞[1,2], 魏雅喆[1], 邵晓鹏[1*]

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 海面的强镜面反射导致强烈太阳耀光, 造成海面目标探测中目标丢失. 针对该问题, 利用渥拉斯顿棱镜的分光特性及海面杂波的偏振特性, 设计了一种中波红外实时偏振成像系统, 经分光在同一探测器上获得两幅偏振态相互正交的目标场景偏振子图像. 并通过偏振子图像计算场景偏振度, 结合目标与背景的偏振特性差异, 为准确识别目标提供依据. 结果表明, 该系统能够有效抑制太阳耀光, 并能够充分利用偏振度实现目标探测.

关 键 词: 太阳耀光; 中波红外; 偏振成像; 渥拉斯顿棱镜
中图分类号: O439 文献标识码: A

Real-time mid-infrared polarization imaging system design for marine targets detection

HAN Ping-Li[1], LIU Fei[1,2], WEI Ya-Zhe[1], SHAO Xiao-Peng[1*]

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian Univeristy, Xi'an 710071, China;
2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academic of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In marine target detection, a target could be lost by a mid-infrared detector if it's located in sun glint area. Aiming at this problem, a real-time mid-infrared polarization imaging system employing a Wollaston Prism was designed which utilized the polarization characteristics of sun glint. The Wollaston Prism enabled beam separation into ordinary and extraordinary rays which vibrate at two orthogonally polarized directions, and two images were acquired on the same detector plane with light focused by an imaging lens. Degree of polarization of the target scene could be calculated and assist to detect marine targets. It enables effective sun glint suppression and marine targets detection.

Key words: sun glint, mid-infrared, polarization imaging, Wollaston prism
PACS: 42.15. Eq, 42.25. Ja, 61.80. Ba, 92.10. Pt

引言

有关海上搜救技术的研究得到国内外学者的广泛关注[1]. 其中红外成像技术全天候工作的特点, 为及时高效地开展搜救工作提供了有力支持[2-3].

受复杂海面背景的影响, 海面红外图像中目标常淹没于背景中, 例如当海面目标温度与海水温度接近时, 红外成像难以分辨二者差别, 导致目标丢失; 海面对太阳光和天空光的强烈反射所产生的太阳耀光(sun-glint) 进入红外成像系统, 当目标辐射强度弱于太阳耀光或太阳耀光强度超出探测器饱和响应范围时, 亦将导致图像中目标丢失[4-5]. 美国波多黎各大学 Goodman[6] 和夏威夷大学 Hochberg[7] 的研究表明, 海面太阳耀光及波浪

收稿日期: 2018-02-27, 修回日期: 2018-09-28 Received date: 2018-02-27, revised date: 2018-09-28
基金项目: 国家自然科学基金(61475123, 61705175), 中国博士后科学基金面上项目(2017M613063), 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室基金(CS16017050001), 中央高校基本科研业务费(JB170503)
Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61475123, 61705175), the China Postdoctoral Science Foundation (2017M613063), the State Key Laboratory of Optical Technology for Applied Optics, Chang Chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, China (CS16017050001), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (JB170503)
作者简介(Biography): 韩平丽(1990-), 女, 河北衡水人, 博士研究生, 主要研究领域为水下偏振成像技术. E-mail: 2008hanpingli@163.com
* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

运动等引起的强烈杂波会对成像结果造成严重影响,由此引起的目标探测误差最大可达 30%. 在应对可见光波段太阳耀光的研究中,法国的 Fougnie [8] 利用太阳耀光的偏振特性,通过一个可旋转的偏振器控制只允许沿某一个特定方向振动的光通过,抑制进入光学系统的杂波强度,获得了较为理想的探测效果. 与可见光波段类似,红外波段的太阳耀光、海面自发辐射等背景辐射也存在特定的偏振特性. Alfred W Cooper [9] 和 Dennis J. Gregoris [10] 利用 Cox-Munk 三维波浪斜坡面分布函数分析太阳耀光的偏振特性发现,在中波红外范围内,成像过程中背景辐射主要来自海面太阳耀光; 在长波红外范围内,背景辐射则主要为海面的自发辐射,故在不同工作波段均可利用海面辐射的偏振特性抑制背景杂波. 此外,Alfred W Cooper 通过研究证明,在同一波段内太阳耀光与海面自发辐射存在不同的偏振方向和偏振强度 [11-12] ,这一差异能够为海面目标探测提供理论支持.

Fougnie [8] 提出的利用一个偏振器抑制可见光波段海面背景杂波的方法同样适用于红外波段的海面目标探测,但由于单个偏振器仅能抑制某一特定方向的背景辐射,因此当背景杂波较为复杂时,该方法难以获得理想效果,且探测过程中需要调整偏振器透光轴方向以获得最佳抑制效果,实时性差. Zhao Huijie 等设计了一种双偏振器中波红外成像系统,其中两个偏振器均可旋转和拆卸,主要针对强烈太阳耀光情况下,经单个偏振器抑制后的太阳耀光强度仍超过探测器饱和响应范围的情况,通过另一个偏振器进一步压缩太阳耀光饱和效应 [2] . 但同样存在实时性差的问题,且不能够充分利用目标与背景的偏振特性差异.

针对海面目标探测中,红外成像受复杂海面背景杂波严重影响的问题,设计了一种基于渥拉斯顿棱镜的实时中波红外偏振成像系统. 该系统以渥拉斯顿棱镜为偏振分光元件,利用其能够分离两个具有正交偏振态光束的能力,实现实时偏振成像,最终在同一探测器上获取两幅目标场景图像,该成像系统在移动平台的应用及海面运动目标探测中具有显著优势. 根据太阳耀光为特定方向偏振光的特点抑制太阳耀光. 此外,基于该成像系统所获得的两幅正交偏振态子图像能够进一步获取目标场景偏振度,结合太阳耀光、目标自发辐射和海面自发辐射之间的偏振特性差异,为海面目标探测及识别提供依据.

1　海面杂波的偏振特性分析

海面目标探测中,到达红外探测器的辐射 L_0 可以根据来源分为两部分: 目标自发辐射 L_t 和背景辐射 L_{bg},如式(1) 所示 [2] .

$$L_0 = L_t + L_{bg} \quad , \quad (1)$$

其中,背景辐射为来自海面的杂波辐射,由三部分构成,分别为: 海面的自发辐射 L_{sse},太阳辐射入射到海面后的镜面反射 L_{sg},以及天空光经海面的反射光 L_{sky} [8] ,如图 1 所示. 海面反射的太阳辐射 L_{sg} 即为太阳耀光,相比其他部分杂光,强烈的太阳耀光极易导致海面目标淹没于背景中造成目标丢失.

$$L_{bg} = L_{sse} + L_{sg} + L_{sky} \quad . \quad (2)$$

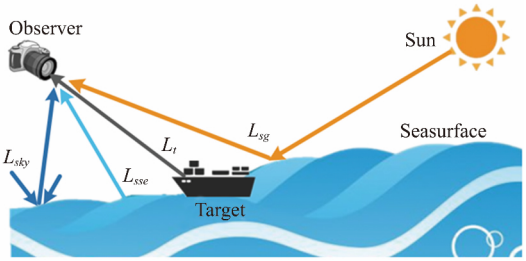

图 1　海面目标探测中到达探测器的信号组成

Fig. 1　Schematic diagram showing the routes by which sunlight reaches a detector in sea-surface target detection

根据式(2) ,海面同时发射和反射辐射,设海面发射率为 ε,反射率为 ρ,根据发射反射定律有 $\varepsilon + \rho = 1$ [13] . 故式(2) 实际为式(3) 的简化形式,

$$L_{bg} = \varepsilon L_{sse}' + \rho L_{sg}' + \rho L_{sky}' \quad , \quad (3)$$

其中 $\varepsilon L_{sse}'$ 为实际海面自发辐射,$\varepsilon L_{sg}'$ 和 $\varepsilon L_{sky}'$ 分别为到达海面未经反射前的太阳辐射和天空辐射.

受海风影响,真实海洋表面存在起伏不定的波浪,与镜面不同,菲涅尔定律、斯涅尔定律等光学定律不能直接应用于海面表面光学参数的计算. 在此之前,需首先建立海洋表面的三维模型,起伏的海洋表面可以视为由倾斜状况不同的许多斜坡面组成,建立如式(4) 所示的二维高斯分布函数由海面风速和风向所决定的三维波浪斜坡面分布模型 [14-15] .

$$p(Z_x, Z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_u}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{Z_x}{\sigma_c}\right)^2 + \left(\frac{Z_y}{\sigma_u}\right)^2\right]\right\} \quad , \quad (4)$$

式中,Z_x 和 Z_y 为分别为斜坡面在 x, y 方向的分量,σ_c 和 σ_u 分别为 Z_x 和 Z_y 的均方根. σ_c^2 和 σ_u^2 与风速 V 线性相关,如式(5) 所示 [16] ,

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\sigma_c^2 = 0.003\,5 + 0.000\,671V$$
$$\sigma_u^2 = 0.004\,8 + 0.005\,12V \quad ,(5)$$
$$\sigma^2 = \sigma_c^2 = \sigma_u^2 = 0.010\,1 + 0.002\,19V$$

其中,速度 V 单位为 m/s. 由式(5)可知 σ^2 与风向无关,其相比于 σ_c^2 和 σ_u^2 能够更好地表征风速对海面起伏的影响.

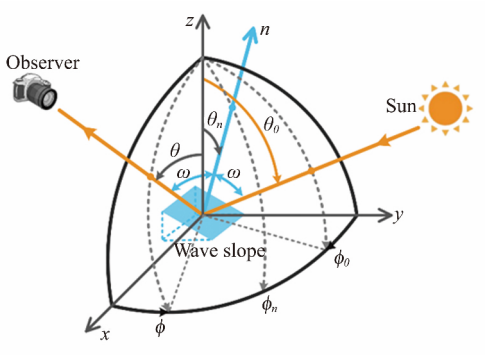

图2 海面波浪单个小斜坡面上的几何反射模型[17]

Fig. 2 Specular reflection geometry on a small flat surface of the sea waves

根据三维波浪斜坡面分布模型建立如图2所示的坐标系,θ 和 ϕ 分别为观察天顶角和方位角,θ_0 和 ϕ_0 分别为太阳天顶角和方位角. 当太阳方位为(θ_0,ϕ_0),观察方位为(θ,ϕ)时,太阳耀光的观测概率为[18],

$$p(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{1}{\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{\tan^2\theta_n}{\sigma^2}\right) = P(\theta_n,V) \quad , \quad (6)$$

其中,

$$Z_x^2 + Z_y^2 = \tan^2\theta_n \quad , \quad (7)$$

式中,(θ_n,ϕ_n)如图2所示. 用 ω 表示反射角,θ_n 可以由式(8)和(9)推导得出[19],

$$\cos 2\omega = \cos\theta\cos\theta_0 + \sin\theta\sin\theta_0\cos(\phi - \phi_0) \quad ,(8)$$

$$\theta_n = \arccos\left(\frac{\cos\theta + \cos\theta_0}{2\cos\omega}\right) \quad . \quad (9)$$

不考虑大气对辐射传输的影响,利用概率密度函数 $P(\theta_n,V)$ 可以得到特定几何关系下的方向反射率[18],

$$R_g(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{\pi\rho(\omega)P(\theta_n,V)}{4\cos\theta_0\cos\theta\cos^4\theta_n} \quad , \quad (10)$$

式中,$\rho(\omega)$ 为菲涅尔反射系数. 在构成海面起伏波浪的某单个斜坡面上,可以视太阳光遵从镜面反射,根据菲涅尔定律[20],反射光的反射系数为,

$$\rho(\omega) = \frac{[\rho^s(\omega)]^2 + [\rho^p(\omega)]^2}{2} \quad , \quad (11)$$

其中,

$$\rho^s(\omega) = \frac{n_2\cos\omega - n_1\cos\omega_t}{n_2\cos\omega + n_1\cos\omega_t}$$
$$\rho^p(\omega) = \frac{n_1\cos\omega - n_2\cos\omega_t}{n_1\cos\omega + n_2\cos\omega_t} \quad . \quad (12)$$

式中,$\rho^s(\omega)$ 和 $\rho^p(\omega)$ 分别为海面对太阳辐射中 s 分量(平行于入射面)和 p 分量(垂直于入射面)的反射率,n_1 为空气的折射率,n_2 为海水的折射率,ω 为太阳辐射在海面的入射角,ω_t 为折射角.

利用式(10)中的方向反射率可计算特定几何条件下的太阳耀光强度 $L_g(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V)$,

$$L_g(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{E_0\rho(\omega)P(\theta_n,V)}{4\cos\theta\cos^4\theta_n} \quad ,(13)$$

式中,E_0 为入射到海面的太阳辐照度.

太阳光可以视为非偏振光[21],则式(10)中某个单斜坡面上的反射系数可以反映该斜坡面上反射光的偏振特性. 根据偏振度的定义[22],反射光的偏振度可以表示为

$$\mathrm{DoP} = \frac{\rho^s - \rho^p}{\rho^s + \rho^p} \quad , \quad (14)$$

式(14)即为太阳耀光偏振度. 经计算,在中波红外3~5 μm 范围内,太阳耀光的偏振度值恒为正,证明其中 s 分量占优;且 p 分量在绝大多数情况下都存在[5,11].

此外,根据反射率和发射率的关系,某一单斜坡面上海面发射率可以表示为

$$\varepsilon^s = 1 - \rho^s$$
$$\varepsilon^p = 1 - \rho^p \quad , \quad (15)$$

其中,ε^s 和 ε^p 分别为海面在两个不同偏振方向的发射率. 则海面自发辐射偏振度可以根据式(14)计算得到,结果表明海面自发辐射中 p 分量占优[5]. 即在红外波段内,海面背景杂波的偏振特性必然存在且与杂波来源有关,当背景杂波主要为太阳耀光时,其偏振方向主要为 s 方向;当在太阳耀光区域外,背景杂波主要来自海面自发辐射时,其偏振方向主要为 p 方向.

2 基于渥拉斯顿棱镜的中波红外实时偏振成像系统设计

利用红外辐射偏振特性抑制海面杂波的传统方式为在红外成像系统前增加一个或两个可旋转的偏振器[2],如图3所示,抑制进入光学系统的太阳耀

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光. 为充分利用海面背景辐射与目标辐射的偏振特性差异,本文以渥拉斯顿分光棱镜为基础,设计中波红外实时偏振成像系统,抑制太阳耀光并利用目标与背景辐射的偏振特性差异探测识别海面目标.

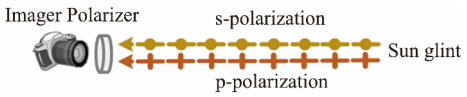

图 3　利用偏振器抑制某个偏振方向的太阳耀光
Fig. 3　Suppress sun glint in s-polarization or p-polarization

渥拉斯顿棱镜作为一种分光元件,能够产生两束分开的光矢量互相垂直的线偏振光[19],如图 4(a) 所示. 一束正入射的平行光在棱镜 ABC 内沿垂直于光轴的方向传播,此时,o 光和 e 光传播方向相同但传播速度不同; 当到达分界面 AC 时,棱镜 ADC 光轴相对于棱镜 ABC 的光轴旋转了 90°,o 光和 e 光发生转化. 原来的 o 光进入棱镜 ADC 后转化为 e 光,且属于从光密介质进入光疏介质,其传播方向偏离法线; 类似地,原来的 e 光进入棱镜 ADC 后转化为 o 光,且传播方向靠近法线. 当二者在 CD 面出射时,将再次发生偏折,即出射光为两束带有一定夹角的光矢量相互垂直的线偏振光,该角度称为离散角,与棱镜材料和棱镜楔角有关[19].

本系统设计中选用的渥拉斯顿棱镜为 Thorlabs 公司生产的 WPM10,其工作波段为 200 nm ~ 6 μm,尺寸大小如图 4(a) 所示. 该元件在中波红外 3.5 ~ 4.8 μm 内能够保证高于 90% 的透过率,消光比大于 10 000:1,其透过率曲线如图 4(b) 所示,能量利用率较高.

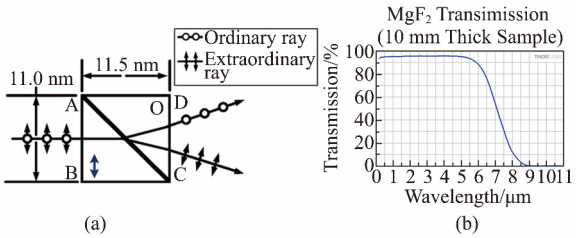

图 4　本系统设计中所用渥拉斯顿棱镜,(a) 示意图和光路图,(b) 透过率曲线
Fig. 4　The WP selected in the designed infrared imaging system (a) Schematic and ray diagram and (b) transmission curves

系统成像原理如图 5 所示,整体结构主要包括前置物镜 L_1、准直镜 L_2、分光棱镜 WP 和成像目镜 L_3 四部分. 根据前文分析,渥拉斯顿棱镜为整体系统的核心元件,能够通过将入射光束分离为偏振态相互正交的两束子光束,以实现一次曝光同时获取两幅目标场景图像,降低了系统复杂度并提高实时性.

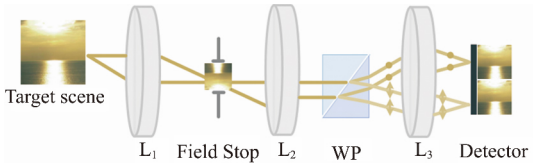

图 5　系统成像原理图
Fig. 5　Schematic of the designed imaging system

图 6 为系统整体设计结构图. 系统设计中考虑到所用渥拉斯顿棱镜的几何尺寸和分光角度,为提高能量利用率,前置物镜 L_1 采用大口径设计,最大程度收集入射辐射进入光学系统; L_2 为准直系统,以确保入射辐射平行入射至渥拉斯顿棱镜; 平行光经渥拉斯顿棱镜分光后分离为两束光矢量振动方向相互垂直的线偏振光,最终两束光分别经成像目镜 L_3 汇聚入射至同一探测器,并获得两幅正交偏振态的目标场景图像.

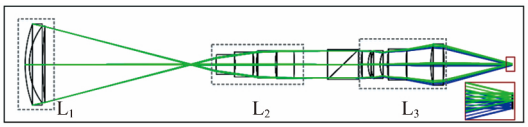

图 6　光学系统结构图
Fig. 6　Structure of the optical system

观察图 6 系统像面光线汇聚结果可见,系统能够将偏振态不同的两束光线完全分开,即能够在同一探测器上获得两幅偏振态相互正交且无重叠的目标场景图像. 此外,通过图 7 中系统的偏振瞳图可见,以 45°方向的入射偏振光为例,该系统最终能够获得 0°和 90°两相互正交方向的完全线偏振光且不掺杂圆偏振光与椭圆偏振光.

前述分析证明,该系统能够有效获得目标场景偏振信息. 通过图 8 中的 MTF 曲线综合评价系统的成像情况. 系统在两种偏振态下的 MTF 曲线分别如图 8(a) 和(b) 所示,全视场内 MTF 值整体趋势一致,且在截止频率处曲线最低值可达 0.4 以上,整体具有较高的分辨率,成像质量良好. 此外,该成像系统在两种偏振状态下全谱段点列图均方根半径(RMS) 最大值为 14.029 μm,小于目标探测器像元尺寸,满足探测器成像设计需求. 由图 9 所示的整体系统场曲与畸变图可知,该系统在全视场内场曲在

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

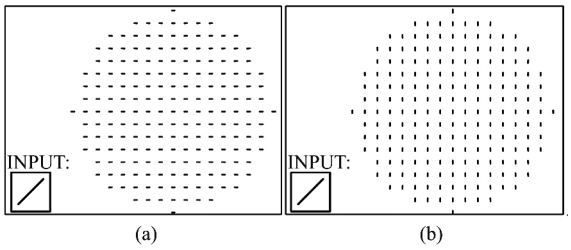

图 7 系统偏振瞳图(a)偏振状态 1,(b)偏振状态 2
Fig. 7 Polarization map of the designed system. (a) The first polarization state and (b) the second polarization state

0.1 mm 范围内,而两种偏振态下系统的畸变均小于 0.1%,控制在理想范围内.

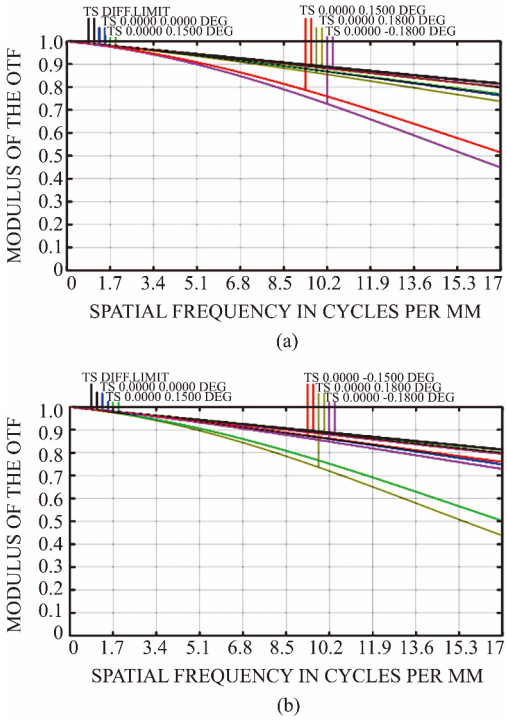

图 8 系统 MTF 曲线(a)偏振状态 1,(b)偏振状态 2
Fig. 8 MTF curves of the designed system. (a) The first polarization state and (b) the second polarization state

3 分析与讨论

3.1 背景辐射抑制分析

由第 2 节的分析可知,对于某个单斜坡面,当太阳方位与观察方位确定后,存在该特定几何条件下的方向反射率,如式(10)所示. 该斜坡面上反射系数可通过菲涅尔定律计算,如式(12)所示,进一步可通过式(14)计算反射光偏振度. 结合菲涅尔反射系数和偏振度计算偏振反射系数,

$$\rho_p + \rho \cdot \mathrm{DoP} \quad . \quad (16)$$

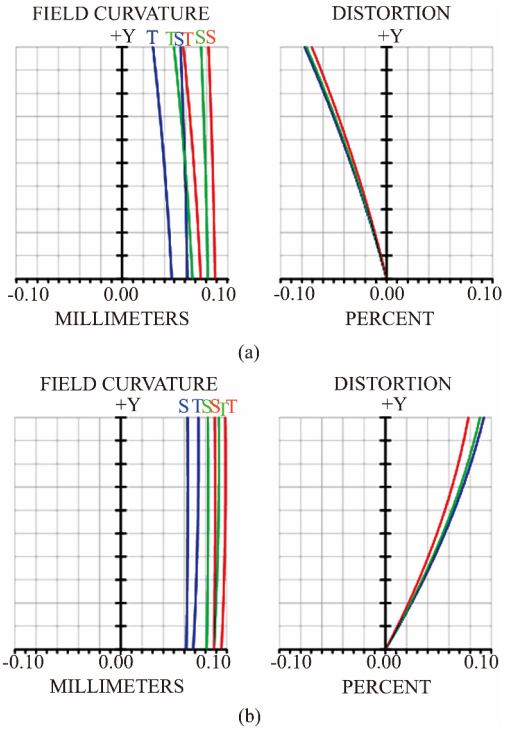

图 9 系统场曲畸变图(a)偏振状态 1,(b)偏振状态 2
Fig. 9 Field curvature and distortion of the designed system. (a) The first polarization state and (b) the second polarization state

用偏振反射系数 ρ_p 代替式(10)方向反射率中的反射系数,得到式(17)表示的方向偏振反射率,

$$R_{\mathrm{gp}}(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{\pi\rho_p(\omega)P(\theta_n,V)}{4\cos\theta_0\cos\theta\cos^4\theta_n} \quad . \quad (17)$$

与此对应的太阳耀光中偏振光强度如式(18)所示.

$$L_{\mathrm{gp}}(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{E_0\rho_p(\omega)P(\theta_n,V)}{4\cos\theta\cos^4\theta_n} \quad . \quad (18)$$

结合式(13)和式(18),太阳耀光为部分偏振光,可以视为由完全偏振光和完全非偏振光两部分构成,其中完全偏振光强度如式(18)所示,完全非偏振光强度存在如式(19)所示形式.

$$L_{\mathrm{gup}}(\theta,\phi;\theta_0,\phi_0;V) = \frac{E_0(1-\rho_p(\omega))P(\theta_n,V)}{4\cos\theta\cos^4\theta_n} \quad . \quad (19)$$

对于通过旋转偏振器透光轴方向滤除部分太阳耀光的传统红外偏振成像系统,当透光轴方向与太阳耀光偏振方向相互垂直时,到达探测器的太阳耀光强度 L_{gd} 最小,为式(20)中太阳耀光完全非偏振部分强度的一半.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$L_{gd} = \frac{L_{gup}}{2} = \frac{E_0(1-\rho_p(\omega))P(\theta_n,V)}{8\cos\theta\cos^4\theta_n}. \quad (20)$$

本文设计的中波红外实时偏振成像系统，通过渥拉斯顿棱镜分光，将入射光分解为两束偏振态相互正交的光束后入射至同一探测器，其中包含的太阳耀光分量分别记为 L_{gd1} 和 L_{gd2}，其强度可通过式(21)计算.

$$L_{gd1} = \frac{E_0(1-\rho_p(\omega))P(\theta_n,V)}{8\cos\theta\cos^4\theta_n}, \quad (21a)$$

$$L_{gd2} = \frac{E_0(1+\rho_p(\omega))P(\theta_n,V)}{8\cos\theta\cos^4\theta_n}. \quad (21b)$$

对比可见，式21(a)与式(20)具有完全相同的形式，即在太阳耀光强度抑制方面，该中波红外实时偏振成像系统具有同传统红外偏振成像系统相同的能力.

在实验室环境下模拟红外成像中太阳耀光对水面目标的影响，利用白光光源模拟太阳光照射水面，目标为长宽高分别为 7 cm 的塑料立方体，迎着反射光方向设置探测器对目标及耀光成像，获得图 10 所示结果. 其中图 10(a)为探测器直接获取的目标场景红外强度图像，图 10(b)则经过偏振器滤除了部分入射辐射. 原始强度图像中存在强烈的反射辐射，目标右部边缘被严重覆盖难以分辨; 图 10(b)经偏振器滤除部分入射辐射后，耀光强度显著减弱，被覆盖的目标边缘得到凸显. 该结果表明，利用红外偏振成像的方法能够有效抑制太阳耀光对目标探测的影响.

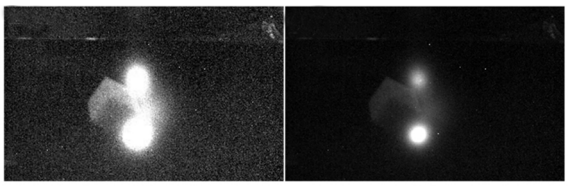

图 10　太阳耀光在水面目标探测中的影响实验模拟结果，(a)红外强度图像，(b)红外偏振图像

Fig. 10　Simulation images of sun glint in marine target detection by experiment. (a) Infrared image of target scene; (b) infrared polarization image of target scene

3.2　偏振信息解析分析

受物质自身材料、粗糙度等性质的影响，不同物质红外自发辐射存在由其自身决定的偏振特性[23]. 利用本文设计的基于渥拉斯顿棱镜的实时红外偏振成像系统在单探测器上同时获取的偏振态正交的两幅子图像，根据式(14)中偏振度的定义，计算目标场景的偏振度图像. 在偏振度图像中，利用目标辐射、海面自发辐射、太阳耀光之间的偏振度差异能够进一步准确识别目标. 以图 11 中的实验结果为例，图 11(a)和(b)分别为目标场景原始红外强度图像和经偏振器滤波后的图像，图 11(c)为利用目标场景偏振图像计算得到的偏振度. 对比强度图像和偏振度图像可见，耀光和目标辐射强度接近，单独通过红外成像无法直接分辨二者差别; 计算场景偏振度信息后，目标与耀光之间呈现出清晰可辨的差异，目标自发辐射偏振特性较弱，整体灰度值偏低，相比之下，耀光偏振特性较强，相对目标呈现较高灰度值. 且偏振度图像中耀光干扰已得到较强抑制，仅强度较高的部分区域呈现模糊耀光轮廓，表明利用耀光和目标的偏振特性差异能够为识别水面目标提供依据. 图 11(d)～(f)分别对应图 11(a)～(c)中红色矩形对应的区域，该区域中耀光覆盖部分目标导致无法通过辐射强度将二者分离，如图 11(d)所示; 利用偏振器虽然将耀光强度大幅度抑制，由于目标辐射同时被部分滤除，目标并未得到明显凸显，如图 11(e). 相比之下，图 11(f)因为利用了耀光和目标偏振特性的差异，目标轮廓等细节信息显著提升，耀光基本得到去除.

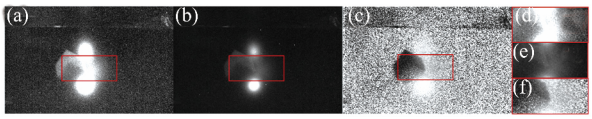

图 11　耀光实验模拟及偏振处理结果，(a)目标场景红外强度图像，(b)目标场景偏振图像，(c)目标场景偏振度图像，(d)～(f)分别对应(a)～(c)中红色矩形对应区域的放大结果

Fig. 11　Simulation images by experiment and processed results. (a) Infrared image of the target scene, (b) polarization image of the target scene, (c) degree of polarization (DoP) of the target scene and (d)～(f) enlarged images corresponding to the areas in (a)～(c) outlined by a red rectangle

图 12 通过实验模拟水面背景自发辐射对目标探测的影响，其中(a)、(b)、(c)分别为红外强度图像，红外偏振图像和偏振度图像. 红外强度图像中，目标与水体表现出强度相当的自发辐射，经计算，目标区域平均灰度值为 219，水面区域平均灰度值为 167. 红外偏振图像中，目标辐射和水面自发辐射均得到一定程度抑制. 偏振度图像中目标和背景呈现出明显差异，图中目标区域平均灰度值为 71，水面区域平均灰度值为 160，偏振度图像中灰度值大小直接反映偏振度大小，灰度值越大，偏振度越大. 目标和水面背景差异明显增大，且目标偏振度明显小

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

于水面目标偏振度，表明通过偏振信息能够为识别水面目标提供依据.

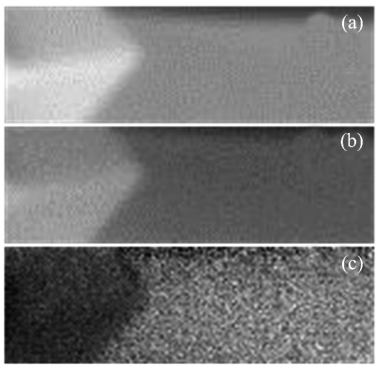

图12 水面自发辐射模拟及偏振处理结果（a）目标场景红外强度图像，（b）目标场景偏振图像，（c）目标场景偏振度图像

Fig. 12 Simulation images of water irradiance by experiment and processed results. (a) infrared image of the target scene, (b) polarization image of the target scene and (c) degree of polarization (DoP) of the target scene

上述分析证明，目标辐射、太阳耀光存在由自身特性决定的偏振特性差异，该差异能够为抑制太阳耀光影响、探测识别海面目标提供依据. 本文设计的中波红外实时偏振成像系统能够保证偏振特性差异的获取，有效实现海面目标探测.

4 结论

综合考虑海面目标探测中海面背景杂波的偏振特性，利用渥拉斯顿棱镜的分光能力，设计了一种中波红外实时偏振成像系统. 其针对海面太阳耀光和海面自发辐射的干扰，利用二者偏振方向和强度的差异获取两幅偏振态相互正交的场景偏振子图像，抑制了太阳耀光影响. 此外，通过该组正交偏振子图像计算目标场景偏振度，为充分利用海面目标、太阳耀光、海面自发辐射之间的偏振特性差异，识别海面背景下的目标提供依据，保证目标的精确探测和准确识别.

References

[1] SHEN Guo-Tu, GAO Jing. Computerized simulation of infrared images of ship targets on the sea [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (沈国土，高景. 海面船目标红外图像的计算机模拟. 红外与毫米波学报) 2002, **21**(1): 14-18.

[2] Zhao H J, Ji Z, Zhang Y, *et al*. Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in sun glint [J]. *Optics Express*. 2016, **24**(15): 16396-16409.

[3] Moon Y S, Zhang T X, Zuo Z, *et al*. Detection of sea surface small targets in infrared images based on multilevel filter and minimum risk Bayes test [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2000, **14**(07): 907-918.

[4] Lynch D K, Dearborn D S, Lock J A. Glitter and glints on water [J], *Applied Optics*. 2011, **50**(28): F39-F49.

[5] Cooper A W, Lentz W J, Walker P L, Infrared polarization ship images and contrast in the MAPTIP experiment [C]. *SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. Denver, International Society for Optics and Photonics, 1996: 85-96.

[6] Goodman J A, Lee Z, Ustin S L. Influence of atmospheric and sea-surface corrections on retrieval of bottom depth and reflectance using a semi-analytical model: a case study in Kaneohe Bay, Hawaii [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(28): F1-F11.

[7] 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.

[8] Fougnie B, Frouin R, Lecomte P, *et al*. Reduction of skylight reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(18): 3844-3856.

[9] Cooper A W, Crittenden E C, Milne E A, *et al*. Mid- and far-infrared measurements of sun glint from the sea surface [C]. 1992 *Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement*, San Diego, INT SOC FOR OPTICAL ENGINEERING, 1992: 176-185.

[10] Gregoris D J, Yu S KW, Cooper A W, *et al*. Dual-band infrared polarization measurments of sun glint from the sea surface [C]. 1992 *Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds II*, Orlando, 1992: 381.

[11] Cremer F, Schwering P B, Jong W D, *et al*. Infrared polarization measurements of targets and backgrounds in a marine environment [C]. 2001 *Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls*, Orlando, International Society for Optics and Photonics, 2001: 169-180.

[12] Martin J, Eugenio F, Marcello J, *et al*. Automatic sun glint removal of multispectral high-resolution WorldView-2 imagery for retrieving coastal shallow water parameters [J]. *Remote Sensing*. 2016, **8**(17): 16.

[13] LIANG Quan-Ting. *Physics Optics* [M]. Beijng: Publishing House of Electronics Instrustry (梁铨廷. 物理光学. 北京: 电子工业出版社), 1980: 21-29.

[14] 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.

[15] Alexander M, Kudryavtsev V, Chapron B J, *et al*. Sunglitter imagery of the ocean surface phenomena [C]. *In ESA Special Publication*, 2010: 48.

[16] Ebuchi N, Kizu S. Probability distribution of surface wave slope derived using sun glitter images from geostationary meteorological satellite and surface vector winds from scatterometers [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, **58**(3): 477-486.

（下转第760页）

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算. 光谱学与光谱分析). 2016, **36**(5): 1428-1433.

[12] LIU Huan-Jun, KABG Ran, Susan Ustin, *et al*. Study on the Prediction of Cotton Yield within Field Scale with Time Series Hyperspectral Imagery [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, (刘焕军,康苒,Susan Ustin, 等,基于时间序列高光谱遥感影像的田块尺度作物产量预测. 光谱学与光谱分析) 2016, **36**(8): 2585-2589.

[13] LIU Peng, ZHANG Jing-Cheng, YANG Pin-Ting, *et al*. Analysis on monitoring of wheat stripe rust at multiple stages and optimization of bands for disease detection [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, (刘鹏, 张竞成, 杨娉婷, 等. 多生育期小麦条锈病光谱波段优选及监测研究. 中国生物防治学报) 2017, **6**: 833-841.

[14] Prasad T S, Krishna G M, Padthasaradhi T, *et al*. Hyperspectral remote sensing of vegetation and agricultural crops [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2014, **80**(80): 697-709.

[15] ZHANG Yao. Hyperspectral quantitative remote sensing inversion model and regieme of multiple pigment at leaf scale based on PROSPECT-PLUS model [D]. Zhejiang University, (张垚. 基于 PROSPECT-PLUS 模型植物叶片多种色素高光谱定量遥感反演模型与机理研究. 浙江大学) 2015.

[16] Cheng T, Ria? o D, Ustin S L. Detecting diurnal and seasonal variation in canopy water content of nut tree orchards from airborne imaging spectroscopy data using continuous wavelet analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **143**(6): 39-53.

(上接第752页)

[17] Wald L, Monget J M. Sea surface winds from sun glitter observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, **88**(C4): 2547-2555.

[18] Cox C, Munk W. Statistics of the sea-surface derived from sun glitter [J]. *Journal of Marine Research*, 1954, **13**(2), 198-227.

[19] La Violette P E, Peteherych S, Gower J. Oceanographic implications of features in NOAA satellite visible imagery [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, **18**(2): 159-175.

[20] Max B, Emil W. *Principles of Optics* [M]. translated by Yang J S. 7nd Edition, Beijing: Ublishing House of Electronics Instrustry, (马科斯 波恩,埃米尔 沃尔夫. 光学原理. 杨蒹荪, 译. 第七版 北京: 电子工业出版社), 2016: 34-36.

[21] Goldstein D H. *Polarized Light* [M]. Bocaraton: CRC Press, 2010: 49-77.

[22] Bass M, DeCusatis C, Enoch J, *et al*. *Handbook of Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 2009: 531.

[23] Li J W, Chen W L, Xu W B, *et al*. *Infrared polarization imaging technology and application* [M]. Beijing: Science Press(李军伟,陈伟力,徐文斌,等. 红外偏振成像技术与应用. 北京: 科学出版社), 2017: 7-13.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net