文章编号 2095-1531(2018)02-0231-06

海面太阳耀光背景下的偏振探测技术

张卫国
(91550 部队,辽宁 大连 116021)

摘要:为了实时抑制太阳耀光对海面目标探测的影响,基于偏振光学理论,设计并构建了一套偏振自适应滤波探测系统。本文介绍了偏振探测系统的功能和组成、偏振探测及背景抑制原理,并给出了该系统的光学设计结果;利用自适应偏振滤波探测系统,通过搭载望远镜跟踪试验平台,针对海上典型目标,开展了相关的偏振验证实验。实验结果表明:海面太阳耀光存在比较明显的偏振特性,采用常规探测手段,探测器极易出现饱和,而利用偏振探测技术则能够有效抑制太阳耀光的影响,进而实现目标的有效探测。

关 键 词:偏振探测;太阳耀光;海面目标;望远镜;背景抑制
中图分类号:O439 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20181102.0231

Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface

ZHANG Wei-guo
(91550 *Units*, *Dalian* 116021, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zwg*222@126.*com*

Abstract: In order to suppress the influence of sun flare on the detection of sea surface targets in real time, a set of polarization adaptive filtering detection system is designed and constructed based on the polarization optical theory. In this paper, the function and composition of the polarization detection system, the principle of polarization detection and background suppression are introduced, then the optical design results of the system are given. By using the adaptive polarization filter detection system and carrying the telescope tracking test platform, relevant polarization verification experiments are carried out for the typical target at sea. The experimental results show that due to there is a significant polarization characteristic of the sun flare on the sea surface, the detector can easily get saturated with the conventional detection method. However, the proposed polarization detection technique can effectively suppress the influence of the solar flare and detect the target.

Key words: polarization detection; solar glare; sea target; telescope; background suppression

收稿日期:2017-11-11;**修订日期**:2017-12-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61605199)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61605199)

1 引 言

平静的海面或者低风速情况下的波动海面可以近似看作微镜的组合。当太阳光入射时,在与入射光方向关于法线对称的反射光方向上会产生强烈的反射辐射,形成太阳耀光。受太阳耀光影响的中心区域,辐射强度使得传感器极易达到饱和,无法实现对海面目标的有效探测[1-5]。

偏振是光的另一个固有属性,是独立于强度、波长和相位的光学信息维度[6-12]。研究表明,太阳耀光具有较明显的偏振特性[13-14],基于该特性,采用偏振自适应滤波探测方法能够:(1)实现对强背景辐射的有效抑制;(2)不受海面目标运动的影响,不受太阳观测相对方位角、风速、风向等因素影响,可实时检测出变化的强散射背景的偏振特性,实现实时的偏振自适应滤波。与常规探测方法相比,该方法能够显著提升海面目标在强散射背景下的探测能力。

本文将偏振探测技术应用于太阳耀光背景下的海面目标探测领域。详细介绍了偏振探测系统的功能和组成、偏振探测及背景抑制原理;并给出了该系统的光学设计结果和偏振定标方法;利用双波段自适应偏振滤波探测系统,针对海上典型目标,开展了相关的偏振验证实验。

2 偏振探测系统的功能和组成

2.1 偏振探测系统的功能

偏振自适应滤波探测系统主要具有以下功能:(1)具备短波红外波段偏振探测图像的实时采集及显示、偏振数据区域选取、数据分析及处理功能;(2)具备偏振自适应实时滤波功能;(3)具备光强、偏振度及偏振角信息处理功能;(4)具备图像灰度自动拉伸功能;(5)具备电动调焦功能。

2.2 偏振探测系统的组成

偏振自适应滤波探测系统主要由前置光学分系统、偏振分析仪分系统、转轮控制分系统和偏振探测仪分系统构成。前置光学分系统将目标/背景的入射辐射进行光谱分光后,分成两路,其中可见光波段进入偏振分析仪分系统,短波红外波段进入偏振探测仪分系统。偏振分析仪与偏振探测仪同光轴,视场大小相近。偏振分析仪利用偏振探测器,能够实时对海面耀光的偏振特性进行测量,为偏振探测仪中的偏振片转轮提供有效的背景抑制方向信息。偏振探测仪具有两种工作模式:(1)当耀光背景的偏振特性较强时,采用旋转滤光片型的偏振探测方式,根据偏振分析仪的测量结果,利用转轮控制分系统实时控制偏振片旋转角度,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;(2)当耀光背景的偏振特性较弱,且强度相对较弱时,偏振片转轮移出光路,采用光强探测方式可最大限度地提升目标与背景的探测对比度。转轮控制分系统根据偏振分析仪测量结果和预先设置的切换阈值,实时控制转轮机构旋转/移出/移入光路。整个偏振自适应滤波系统的内部组成及连接关系图如图 1 所示。

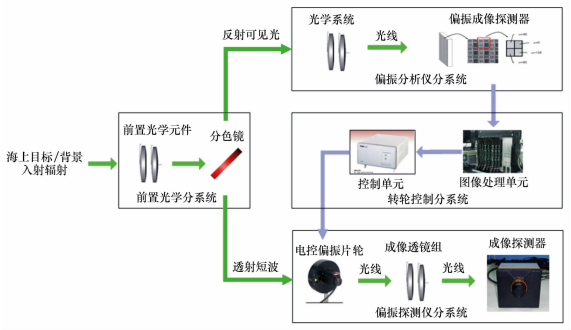


图 1 偏振自适应滤波系统的组成及内部连接关系

Fig. 1 Internal composition and connection in polarization adaptive filtering system

3 偏振探测及背景抑制原理

太阳耀光的入射辐射能量可以表示为斯托克斯矢量形式 $\boldsymbol{S}=(S_0,S_1,S_2,S_3)^{\mathrm{T}}$,其中,分量 S_0 表示光强,分量 S_1 和 S_2 表示线偏振分量,分量 S_3 表示圆偏振分量。光学元件或系统对入射光偏振态的改变可用 4×4 穆勒矩阵 $\boldsymbol{M}$ 描述,假设第 i 次探测时,偏振成像探测系统的穆勒矩阵为:

$$\boldsymbol{M}_i = \begin{bmatrix} M_{i10} & M_{i11} & M_{i12} & M_{i13} \\ M_{i20} & M_{i21} & M_{i22} & M_{i23} \\ M_{i30} & M_{i31} & M_{i32} & M_{i33} \\ M_{i40} & M_{i41} & M_{i42} & M_{i43} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

则探测器获得的光强为:

$$I_i = M_{i10}S_0 + M_{i11}S_1 + M_{i12}S_2 + M_{i13}S_3, \quad (2)$$

若采用具有不同偏振传输特性的成像通道进行 N 次(N 次分时探测或 N 通道探测)成像探测,获得的光强为:

$$\boldsymbol{I} = (I_1, I_2, \cdots, I_N)^T. \quad (3)$$

将 N 次探测过程表示为矩阵形式:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} M_{110} & M_{111} & M_{112} & M_{113} \\ & \cdots & & \\ M_{N10} & M_{N11} & M_{N12} & M_{N13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中,$\boldsymbol{W}$ 为偏振探测系统的探测矩阵,通过求解 $\boldsymbol{W}$ 的逆矩阵 $\boldsymbol{W}^{-1}$ 即可获得入射光的斯托克斯矢量:

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{W}^{-1}\boldsymbol{I}. \quad (5)$$

根据斯托克斯矢量中前三项 S_0、S_1、S_2 因子,即可得到目标图像的偏振度 DoLP 和偏振角 AoP 信息,表示如下:

$$\mathrm{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (6)$$

$$\mathrm{AoP} = \frac{1}{2}\arctan\frac{S_2}{S_1}. \quad (7)$$

根据偏振度 DoLP 分析结果,控制偏振转轮移入/移出光路。移入时,将旋转偏振片角度调整到 AoP +90°方向,即可实现对海面太阳耀光的有效抑制。

4　光学设计结果

偏振自适应滤波探测系统中,全部镜片均采用球面镜设计,最终设计结果如图 2 所示。

系统主口镜为 150 mm,入射光线经过主镜、次镜、三镜和四镜反射后,经过准直透镜,平行入射至分色镜表面,将光路分成 0.5 ~ 0.85 μm 和 0.9 ~ 1.7 μm 两个波段。每组光路又分别经过各自的成像镜组进行成像探测。

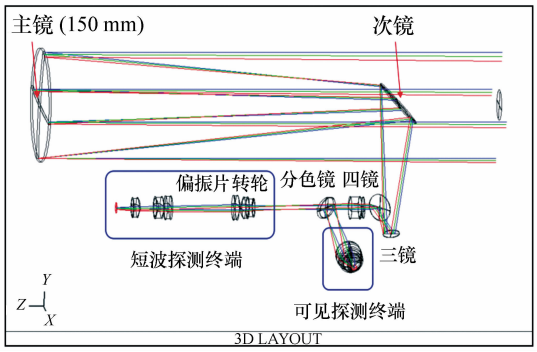


图 2　偏振系统光路示意图

Fig. 2　Optical path schematic of polarization system

采用系统不同波长处的点列图和 MTF(调制传递函数)对系统成像质量进行评价。图 3 为偏振分析仪在 0.5、0.6 和 0.7 μm 对应的点列图。

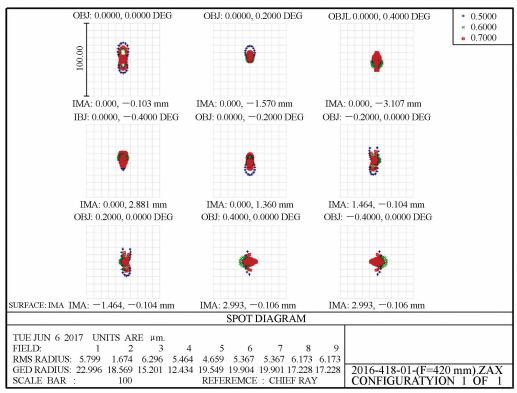


图 3　偏振分析仪点列图

Fig. 3　Spot diagram of polarization analyzer

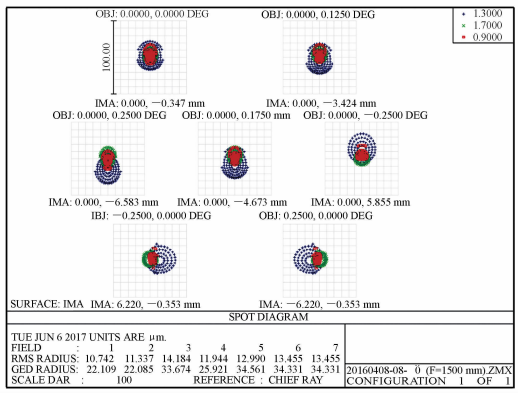


图 4　偏振探测仪点列图

Fig. 4　Spot diagram of polarization detector

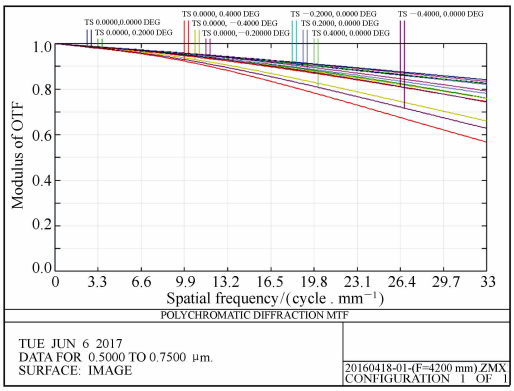


图 5 偏振分析仪 MTF 曲线图

Fig. 5 MTF of polarization analyzer

图 4 为偏振探测仪在 0.9、1.3 和 1.7 μm 对应的点列图。图 5和图 6 分别为偏振分析仪和偏振探测仪的 MTF 曲线图。由图 5、图 6 可知,在满足各自探测器奈奎斯特采样频率的条件下,MTF 平均值(子午面和弧矢面 MTF 的平均值)均大于 0.45,满足应用要求,表明光学系统成像质量良好。偏振分析仪和偏振探测仪所对应的探测视场分别为 0.8°和 0.5°。

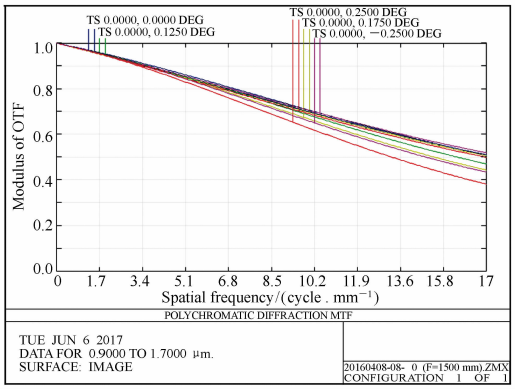


图 6 偏振探测仪 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF curves of polarization detector

5 试验结果及分析

利用偏振自适应滤波探测系统,搭载望远镜跟踪试验平台,针对海上静止和运动目标,分别开展了抑制太阳耀光的偏振验证实验。实验中采用 C++高级程序语言,对相机采集程序和转轮控制程序进行二次开发。利用偏振分析仪的探测矩阵,实时解算目标偏振特性信息,并利用偏振探测仪的探测矩阵,解算偏振片旋转角度,进而完成对太阳耀光的抑制及抑制图像的采集。

针对海面静止目标,典型结果如图 7 所示。可见,经过偏振分析仪的探测,背景海面耀光的偏振度约为 0.4。对比图 7(a)和图 7(b)发现,通过改变偏振片角度,能够对太阳耀光的光强进行调制和抑制;在降低太阳耀光的情况下,目标船的细节特征能够有效凸显。

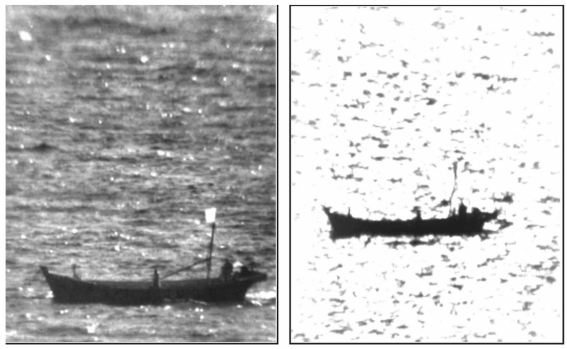
(a) 耀光抑制前
(a) Before suppression

(b) 耀光抑制后
(b) After suppression

图 7 静止目标抑制效果比对图

Fig. 7 Comparison of suppression effects for static target

海面运动目标从非耀光区进入耀光区,由于目标运动速度快,观测时间短,探测过程中通常采

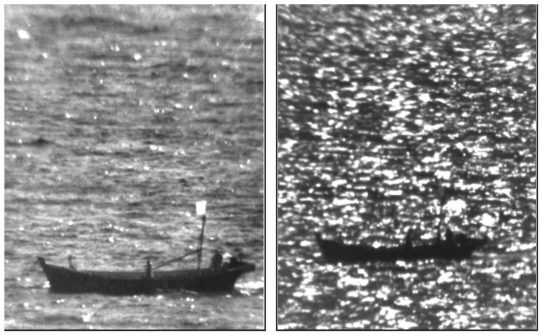


(a) 非耀光区
(a) Non-glare zone

(b) 耀光区(非偏)
(b) Glare zone(Non-polarized)

图 8 采用非偏探测时运动目标非耀光区和耀光区非偏效果比对图

Fig. 8 Comparison of moving target on the non-glare zone and glare zone (non-polarized) by using non-polarization detection



(a) 非耀光区　(b) 耀光区(偏振)
(a) Non-glare zone　(b) Glare zone(Polarized)

图 9　采用非偏探测与偏振探测相结合时运动目标非耀光区和耀光区偏振效果比对图

Fig. 9　Comparison of moving target on the non-glare zone and glare zone(polarized) by combining non-polarizaion and polarization detection technology

用固定积分时间。本文考察了使用固定积分时间,利用非偏探测手段与非偏和偏振手段相结合的效果对比。结果分别如图 8 和图 9所示。数据分析结果见表 1。由表 1 可见,在整个目标观测区域内,采用偏振探测手段能够显著抑制太阳耀光,提升目标探测对比度;从非耀光区到耀光区,采用偏振技术能够将对比度保持在一个合理的范围,能够有效解决固定积分时间下,不同观测区域成像对比度差异大的问题,以及非耀光区对比度不明显或耀光区背景饱和的问题。

表 1　数据分析结果

Tab. 1　Data analysis results

观测区域	目标灰度	背景灰度	对比度
非耀光区	1 174	1 760	0.667
耀光区(非偏)	1 635	4 136	0.395
耀光区(偏振)	807	1 428	0.565

实验过程中,仪器对太阳耀光的观测俯仰角约为 -2°,根据不同的观测方位角,利用偏振分析仪测得的太阳耀光偏振度变化区间为 0.2 ~ 0.3。针对动目标的实验过程中,由于太阳耀光偏振特性的连续变化,且变化量较小,所以控制偏振片旋转角度的响应时间近似为实时。

6　结　论

本文针对海面目标探测时对太阳耀光背景的抑制需求,设计并构建了一套双波段自适应偏振滤波探测系统。将该系统搭载于望远镜跟踪试验平台,以海上典型目标为对象,开展了相关的偏振验证实验。实验结果表明:海面太阳耀光存在比较明显的偏振特性,在精确测得耀光偏振度和偏振角的基础上,能够利用偏振探测技术有效抑制太阳耀光的影响,可确保耀光区内的静止目标及运动目标在观测区域内的有效探测。

参考文献:

[1] LYNCH D K,DEARBORN D S P,LOCK J A. Glitter and glints on water[J]. *Appl. Optics*,2011,50(28):39-49.

[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] GARABA S P,ZIELINSKI O. Methods in reducing surface reflected glint for shipborne above-water remote sensing[J]. *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public*,2013,8:13058.

[4] TONIZZO A,HARMEL T,IBRAHIM A,*et al*.. Sensitivity of the above water polarized reflectance to the water composition [J]. *Proc. of SPIE*,2010,7825:78250F.

[5] ALESSANDRO ROSSI,ALDO RICCOBONO,STEFANO LANDINI. Sun-glint false alarm mitigation in a maritime scenario [J]. *Proc. of SPIE*,2014,9250:92500X.

[6] 李岩,张伟杰,陈嘉玉. 偏振场景目标探测的建模与仿真[J]. 光学 精密工程,2017,25(8):2233-2243.
LI Y,ZHAGN W J,CHEN J Y. Modeling and simulation for target detection in polarization scene[J]. *Opt. Precision Eng.*,2017,25(8):2233-2243. (in Chinese)

[7] 李克武,王黎明,王志斌,等. 弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量术[J]. 光学 精密工程,2016,24(4):690-697.

LI K W, WAGN L M, WANG ZH B, *et al*.. Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 690-697. (in Chinese)

[8] 陈慧敏, 刘新阳. 收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 626-631.
CHEN H M, LIU X Y. Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 626-631. (in Chinese)

[9] 林涛, 赵尚弘, 朱子行, 等. 基于偏振调制的四倍频相位编码信号产生[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(4): 33-37.
LIN T, ZHAO SH H, ZHU Z H, *et al*.. Frequency quadrupling phase-coded signal generation based on polarization modulation[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(4): 33-37. (in Chinese)

[10] 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
LI SH J, JIANG H L, ZHU J P. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)

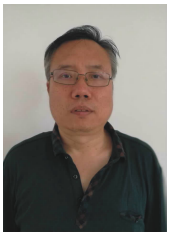
[11] ZHOU G H, XU W J, NIU CH Y, *et al*.. The polarization patterns of skylight reflected off wave water surface[J]. *Opt. Exp.*, 2013, 21(26): 32549-32565.

[12] CHUNMIN Z, BAOCHANG Z, BIN X. Wide-field-of-view polarization interference imaging spectrometer[J]. *Appl. Optics*, 2004, 43(33): 6090-6094.

[13] COX C, MUNK W H. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter[J]. *Scripps Inst. Oceanogr. Bull.*, 1956, 6: 401-487.

[14] JOSé LUIS POOM-MEDINA, JOSUé áLVAREZ-BORREGO, BEATRIZ MARTíN-ATIENZA, *et al*.. Theoretical statistical relationships between the intensities of an image of the sea surface and its slopes: a result comparison of rect and Gaussian glitter functions[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53: 043103.

作者简介:



张卫国(1968—), 男, 山西原平人, 硕士, 高级工程师, 1999 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事靶场光学测量方面的总体研究。E-mail: zwg222@126.com