

偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法

杨梅梅¹, 赵佩瑶², 冯斌³, 赵峰^{1*}

¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;

²西安电子科技大学通信工程学院, 陕西 西安 710126;

³西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072

摘要 水面太阳耀光导致光学图像存在耀斑和舰船目标细节信息丢失。提出了一种偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法。该方法基于水面太阳反射耀光的偏振特性,在成像光路中利用偏振片对耀光进行偏振滤光,对偏振滤光图像中的耀光区域采用多项式拟合估计进行修复。搭建了室外水面耀光偏振成像实验装置,采集得到水面耀光的偏振滤光图像,分别采用基于最小二乘法的多项式列方向曲线、行方向曲线、曲面、逐行多项式曲线拟合的方法对偏振滤光图像进行处理。实验结果表明:偏振滤光和逐行多项式拟合相结合的方法能够有效去除太阳耀光,使得处理后的图像亮度更加自然,既不包含饱和像素,又凸显舰船目标的细节信息。

关键词 大气光学; 太阳耀光; 偏振滤光; 最小二乘法; 多项式拟合; 舰船目标

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2401002

Water Surface Sun Glint Suppression Method Based on Polarization Filtering and Polynomial Fitting

Yang Meimei¹, Zhao Peiyao², Feng Bin³, Zhao Feng^{1*}

¹ School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

² School of Telecommunications Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710126, China;

³ School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract The sun glint on the water surface leads to flares in the optical images and loss of ship target detail information. This paper presents a method of suppressing sun glint on water surface by combining polarization filtering and polynomial fitting. In an imaging optical path, a polarizer is used to filter the glint based on the polarization characteristics of sun glint reflected from the water surface, and the glint areas in the polarization filtering images are estimated through polynomial fitting estimation. The water surface glint polarization imaging experimental device is constructed, and the polarization filtered image of the water surface glint is acquired. Polynomial column direction curve, row direction curve, surface, and line-by-line polynomial curve fitting methods based on the least square method are used to process the polarization filtered image. The experimental results show that using a polarization filter in conjunction with a line-by-line polynomial fitting method can effectively remove the sun glint while also making the processed image brightness more natural, not including saturated pixels and highlighting the details of the ship targets.

Key words atmospheric optics; sun glint; polarization filtering; least square method; polynomial fitting; ship target

OCIS codes 010.1290; 010.4450; 110.5405; 100.3010

收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-01-24; 录用日期: 2021-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1309403)、中央高校基本科研业务费专项基金(3102019ZDHY08)

通信作者: *hfengzhao@xupt.edu.cn

1 引言

水面耀光是太阳光经过水面镜面反射后形成的强辐射信号。可见光相机具有成像分辨率高、体积小、成本低等优点^[1],被广泛地应用于对水域舰船目标进行侦察的领域。当太阳耀光的强度比水体和水面舰船的辐射量高出几十倍时,传感器几乎处于饱和状态,不能从总的辐射量中提取舰船目标细节信息,使得可见光相机的成像效果受到影响,严重影响成像质量^[2]。此外,当水面发生波动时,水面耀光对光电系统的干扰更为复杂。

目前国内外关于水面耀光抑制的解决途径主要分为 3 类,包括光电系统布局上采用规避策略、基于耀光偏振特性的方法、图像处理方法。

光电系统布局上采用的规避策略包括:一是将卫星通过赤道的时间设置为中午 12 点,以减小太阳耀光区域,这时的太阳耀光强度最大,覆盖范围最小,但不能完全避开太阳耀光;二是先将扫描仪设计成垂直、前向和后向三种可变的扫描状态,然后对三者的图像进行拼接,这样就可以有效地消除太阳耀光^[2-4]。该类采用规避策略的方法存在结构复杂、体积大、系统的稳定性差的缺点。

基于耀光偏振特性抑制耀光的方法包括:2001 年,荷兰海牙的 TNO 物理与电子实验室的 Cremer 等^[5]采用的基于中波红外偏振抑制耀光的方法,该方法利用分焦平面的成像器件,通过测量 Stokes 线性偏振参数,使用垂直方向的滤波器,减少了在波浪中太阳耀光产生的热点数量,使得目标更容易被看到;2006 年,罗杨洁等^[2]研究得出当太阳光以布儒斯特角入射,偏振角为 0°时,可以很好地避免太阳耀光;2007 年,赵乃卓等^[4]通过研究光产生偏振现象的物理机理,提出室内镜面理想条件下,通过偏振测量得出任意入射天顶角情况下去除太阳耀光的方法;2016 年,北京航空航天大学的 Zhao 等^[6]采用的基于红外偏振抑制耀光的方法,该方法利用分时的成像器件,借助了菲涅耳模型和 Cox-Munk 模型,利用偏振信息,同时抑制了海面太阳耀光中的红外波段的 s 偏振和 p 偏振成分,但是检测器前面的两个偏振片的最佳角度不容易确定;2017 年,陈卫等^[7]在分析耀光、海面目标的偏振特性基础上,设计了基于双线偏振片的可见光偏振检测系统,进行耀光的抑制;2018 年,张卫国^[8]设计了双波段自适应偏振滤波探测系统,该系统利用偏振探测技术进

行海面太阳耀光的抑制,进行静止目标和运动目标的探测;2019 年,陈卫等^[9]提出一种基于偏振辐射图融合的太阳耀光抑制方法,该方法将所选偏振辐射图与区域耀光抑制偏振辐射图融合,进一步抑制耀光强度。这些方法利用分焦平面偏振相机去耀光的方法,将存在分焦平面相机引起的空间分辨率降为原来的 1/4 和偏振成像组件成本上升的问题;采用多路偏振成像的策略,将出现系统物理硬件的复杂性增加和需要额外的多路偏振图像配准等问题。

图像处理技术抑制耀光的方法包括:1996 年,毛志华等^[10]将成像光谱仪采集的原始图像减去经理论计算得到的海面上太阳耀光分布图,最终得到消除太阳耀光后的海面辐射量分布图。图像处理技术并未改变进入光学镜头入射光的动态范围,在光学成像过程中已经丢失了海面目标的细节信息。

由于水面耀光具有偏振特性,因此利用偏振成像抑制水域耀光具有合理性。但是由于太阳耀光通常呈现部分偏振光特性,仅依靠偏振滤光难以有效抑制太阳耀光。因此,本文提出一种偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法。

2 水面太阳耀光的产生机理及偏振特性理论分析

由于镜面反射的原因,水面出现反射强烈的太阳耀光。当太阳光入射到水面上时,在关于法线方向对称的反射方向上呈现强烈的反射辐射,这就是镜面反射^[11]。当有风时,平静的水面出现倾斜程度不同的斜坡而形成耀光,或在波浪的顶点处形成闪光,这也是水体的镜面反射。水体和舰船目标是低反射率的暗目标,太阳耀光成为水体图像中的噪声。

太阳光本身是自然光,经过水面形成耀光后具有偏振特性。平静水面太阳光的反射服从镜面反射,可以通过菲涅耳方程计算太阳耀光分量的反射率,分别为电场振动面平行于入射面的偏振光 r_p (称为 P 分量)和电场振动面垂直于入射面的偏振光 r_s (称为 S 分量)^[6-7,12-13]。

$$r_s = \frac{\cos \theta_1 - \frac{n_2}{n_1} \cos \theta_2}{\cos \theta_1 + \frac{n_2}{n_1} \cos \theta_2}, \quad (1)$$

$$r_p = \frac{\cos \theta_1 - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_2}{\cos \theta_1 + \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_2}, \quad (2)$$

式中： θ_1 是太阳辐射的入射角； θ_2 是太阳光进入水体后的折射角； n_1 是空气的折射率； n_2 是水体的折射率。

根据 Snell 定律，

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}, \quad (3)$$

可将(1)、(2)式表示为

$$r_s = \frac{\cos \theta_1 - \frac{1}{N} \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \frac{1}{N} \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_1}}, \quad (4)$$

$$r_p = \frac{\cos \theta_1 - N \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + N \sqrt{1 - N^2 \sin^2 \theta_1}}, \quad (5)$$

式中： $N = n_1/n_2$ 。图 1 为平静水面太阳光从空气入射到水体的偏振光菲涅耳反射率与太阳光入射角的关系。

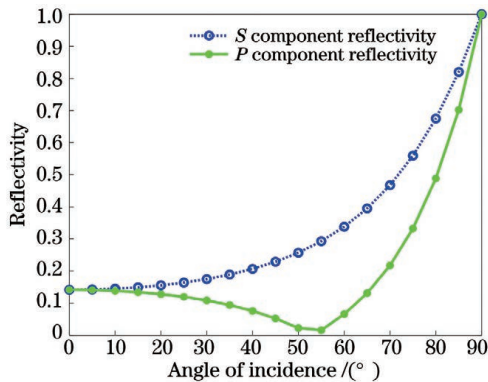


图 1 太阳光从空气入射到光滑水表面的反射率

Fig. 1 Reflectivity of sunlight from the air to the smooth water surface

从图 1 可以看出，当太阳光入射角约为 53° (布儒斯特角) 时，此时折射角近似为 37° ， P 分量没有反射光，此时只有 S 分量的偏振光。在传感器的前面加一个偏振片，使得偏振片的透光轴与入射面平行， S 分量的偏振光将几乎不能通过偏振片进入相机的传感器， S 分量得到最大程度的抑制。

太阳耀光是部分偏振光，为了能够更加清楚地表示太阳耀光的偏振度，因此将太阳耀光的偏振度定义为

$$P' = \frac{I_S - I_P}{I_S + I_P} = \left| \frac{r_S^2 - r_P^2}{r_S^2 + r_P^2} \right|, \quad (6)$$

式中： I_S 为水面反射光 S 分量光强； I_P 为水面反射

光 P 分量光强。将(4)、(5)式代入(6)式，即可求得不同太阳光入射角对应的耀光的偏振度。图 2 为耀光的偏振度随太阳光入射角变化的曲线。由图 2 可知，当太阳光的入射角由 0° 增加到 53° 时，太阳耀光的偏振度由 0 增加到最大值 1，随着入射角从 53° 增加到 90° 时，太阳耀光的偏振度又由 1 逐渐减小到 0。因此当太阳光的入射角为 53° (布儒斯特角) 时，太阳耀光的偏振特性最强，通过偏振片后的太阳耀光强度越小，对太阳耀光的抑制作用越强。

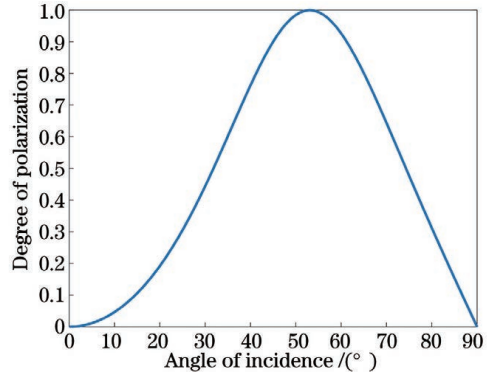


图 2 耀光的偏振度随太阳光入射角变化的曲线

Fig. 2 Polarization degree of glint varying with the incident angle of sunlight

结果表明，可以利用耀光的偏振特性对其进行抑制，但在呈现部分偏振光条件下，该方法对耀光抑制不彻底，因此本文提出一种偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法。

3 所提方法

利用偏振滤光和多项式拟合抑制水面太阳耀光的模型如图 3 所示。

根据上述水面太阳耀光的产生机理及偏振特性理论进行分析，得出：水面太阳反射耀光具有偏振特性，通过在成像光路中增加偏振片，可以在一定程度上对太阳耀光中的 S 分量进行抑制。当太阳光入射角度为布儒斯特角时，偏振滤光能够取得良好的太阳耀光抑制效果；当太阳光入射角度为非布儒斯特角时，偏振滤光后的图像仍有太阳耀斑存在，可利用图像处理方法对耀光区域进行修复。因此所提偏振滤光结合多项式拟合的方法在光学和信息处理两个环节上串行进行水面太阳耀光抑制。所提方法通过在成像光路中增加偏振片对耀光进行偏振滤光，然后采用多项式拟合对偏振滤光图像中的耀光区域进行修复。

3.1 多项式曲面拟合抑制水面太阳耀光的方法

给定一组像素坐标 (x_l, y_l, z_l) , $l = 1, 2, 3, \dots$,

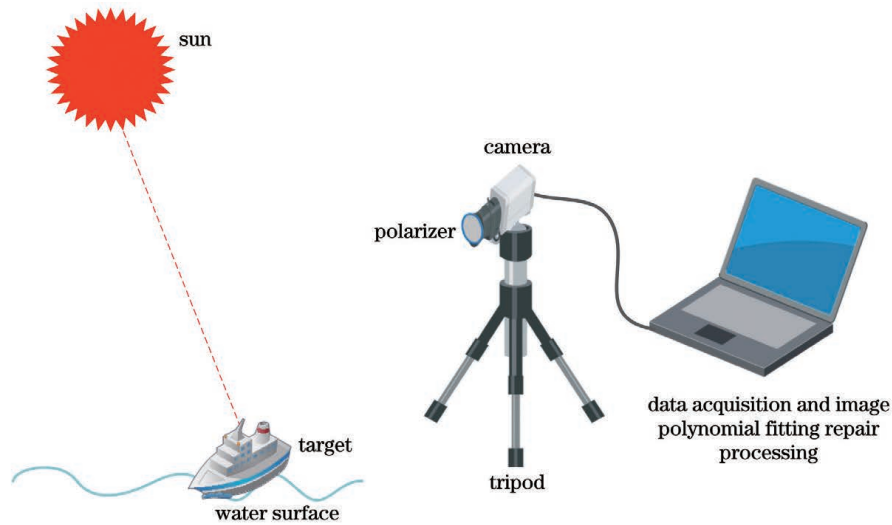


图 3 利用偏振滤光和多项式拟合抑制水面太阳耀光的模型

Fig. 3 Model for water surface sun glint suppression utilizing polarization filtering and polynomial fitting

m , m 表示像素点个数, x_l 表示所拟合曲面中像素点的行坐标, y_l 表示所拟合曲面中像素点的列坐标, z_l 表示所拟合曲面中像素点的灰度值。

$f(x, y)$ 表示二元多项式拟合计算出来的像素点值^[14-15], 使用二元多项式对所给的坐标进行拟合, 表达式为

$$f(x, y) = \sum_{s,j=0,0}^{p,q} a_{sj} x^s y^j = \sum_{s=0}^p \sum_{j=0}^q a_{sj} x^s y^j, \quad (7)$$

即

$$\begin{aligned} f(x, y) = & a_{00} + a_{01}y + a_{02}y^2 + \dots + a_{0q}y^q + a_{10}x + a_{11}xy + a_{12}xy^2 + \dots + a_{1q}xy^q + \\ & a_{20}x^2 + a_{21}x^2y + a_{22}x^2y^2 + \dots + a_{2q}x^2y^q + \dots, \quad (8) \\ & a_{p0}x^p + a_{p1}x^py + a_{p2}x^py^2 + \dots + a_{pq}x^py^q \end{aligned}$$

式中: p 表示对曲面中像素点行方向多项式拟合的次数; q 表示对曲面中像素点列方向多项式拟合的次数。

$$\text{设 } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ \vdots \\ x^p \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ \vdots \\ y^q \end{bmatrix}, \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots & a_{0q} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1q} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{p0} & a_{p1} & a_{p2} & \dots & a_{pq} \end{bmatrix}, \text{函数又可表示为 } f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A}_1 \mathbf{y}, \text{拟合的目的}$$

的就是求出系数矩阵 \mathbf{A}_1 。

采用最小二乘法构造关于系数 a_{sj} 的多元函数, 表达式为

$$M(a_{00}, a_{01}, a_{02}, \dots, a_{pq}) = \sum_{l=1}^m [f(x_l, y_l) - z_l]^2 = \sum_{l=1}^m \left(\sum_{s=0}^p \sum_{j=0}^q a_{sj} x_l^s y_l^j - z_l \right)^2. \quad (9)$$

点 $(a_{00}, a_{01}, a_{02}, \dots, a_{pq})$ 是多元函数 $M(a_{00}, a_{01}, a_{02}, \dots, a_{pq})$ 的极小点, 因此点 $(a_{00}, a_{01}, a_{02}, \dots, a_{pq})$ 必须满足方程组:

$$\frac{\partial M}{\partial a_{sj}} = 0, \quad (10)$$

则

$$\begin{cases} 2 \sum_{l=1}^m a_{00} + a_{01}y_l + a_{02}y_l^2 + \dots + a_{pq}x_l^p y_l^q - z_l = 0 \\ 2 \sum_{l=1}^m (a_{00} + a_{01}y_l + a_{02}y_l^2 + \dots + a_{pq}x_l^p y_l^q - z_l)y_l = 0 \\ 2 \sum_{l=1}^m (a_{00} + a_{01}y_l + a_{02}y_l^2 + \dots + a_{pq}x_l^p y_l^q - z_l)y_l^2 = 0 \\ \vdots \\ 2 \sum_{l=1}^m (a_{00} + a_{01}y_l + a_{02}y_l^2 + \dots + a_{pq}x_l^p y_l^q - z_l)x_l^p y_l^q = 0 \end{cases} \quad (11)$$

将(11)式写成矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} \sum_{l=1}^m 1 & \sum_{l=1}^m y_l & \dots & \sum_{l=1}^m x_l^p y_l^q \\ \sum_{l=1}^m y_l & \sum_{l=1}^m y_l^2 & \dots & \sum_{l=1}^m x_l^p y_l^{q+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{l=1}^m x_l^p y_l^q & \sum_{l=1}^m x_l^p y_l^{q+1} & \dots & \sum_{l=1}^m x_l^{2p} y_l^{2q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^m z_l \\ \sum_{l=1}^m z_l y_l \\ \vdots \\ \sum_{l=1}^m x_l^p y_l^q z_l \end{bmatrix} \quad (12)$$

对(12)式进行化简,得到

$$\begin{bmatrix} 1 & y_1 & \dots & x_1^p y_1^q \\ 1 & y_2 & \dots & x_2^p y_2^q \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & y_m & \dots & x_m^p y_m^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

记 $W = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & \dots & x_1^p y_1^q \\ 1 & y_2 & \dots & x_2^p y_2^q \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & y_m & \dots & x_m^p y_m^q \end{bmatrix}$, $A_2 = \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{pq} \end{bmatrix}$, $Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix}$, 则(13)式可以简化为

$$W \times A_2 = Z \quad (14)$$

在(14)式两边同乘 W 的转置矩阵,得到

$$W^T \times W \times A_2 = W^T \times Z \quad (15)$$

再同时在(15)式两边同时左乘 $W^T W$ 的逆矩阵,得到

$$A_2 = (W^T \times W)^{-1} \times W^T \times Z \quad (16)$$

通过直接求解(16)式,可得拟合曲线方程的系数向量 A_2 ,再根据(8)式即可得出拟合的多项式。

二维曲面拟合抑制水面太阳耀光的具体步骤为

- 1) 设置要进行曲面拟合的区域范围 R_1 , 设置阈值 T_1 , 分别设置行和列方向的拟合次数 p 和 q ;
- 2) 在设置的这个要进行曲面拟合的区域中, 遍历寻找所有小于阈值 T_1 的像素的灰度值 z_1 , 及这个像素在这个区域的行的位置 x_1 和列的位置 y_1 ;
- 3) 根据曲面拟合的原理, 将步骤 2) 得到的像素

所在的行位置 x_1 、列位置 y_1 、灰度值 z_1 代入(16)式, 得出二维曲面拟合的系数 A_2 ;

- 4) 在设置的这个要进行曲面拟合的区域中, 遍历寻找所有大于等于阈值 T_1 的像素的灰度值 z_2 (耀光区域的灰度值), 及像素所在区域的行的位置 x_2 和列的位置 y_2 ;

- 5) 将步骤 4) 得到的 x_2 和 y_2 、拟合次数 p 和 q 、系数向量 A_2 代入(8)式, 求出拟合后的 $f(x_2, y_2)$ 值, 此值即为对大于等于阈值 T_1 的像素的灰度值 z_2 进行抑制后的值, 即可完成耀光区域的抑制。

二维曲面拟合抑制水面太阳耀光的流程如图 4 所示。

当列方向拟合次数 $q=0$ 时, 即变为对像素点进行多项式行方向拟合, 拟合的多项式变为

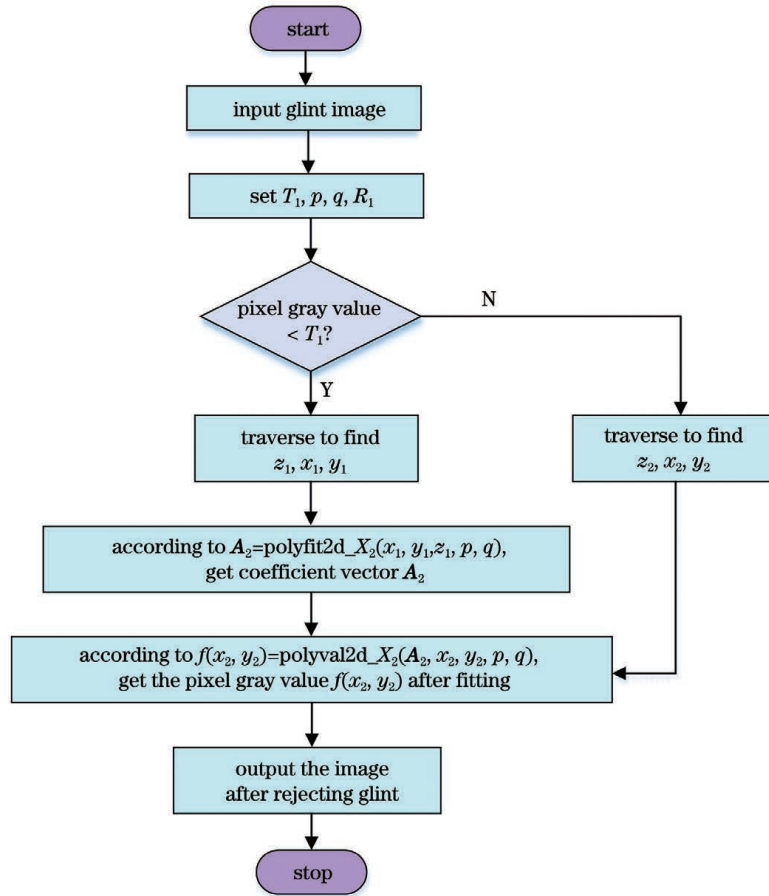


图 4 二维曲面拟合抑制水面太阳耀光的流程

Fig. 4 Flow chart of two-dimensional surface fitting to suppress the sun glint on the water surface

$$f_1(x) = \sum_{s=0}^p a_{s0} x^s = a_{00} + a_{10} x + a_{20} x^2 + a_{30} x^3 + \dots + a_{p0} x^p. \quad (17)$$

当行方向拟合次数 $p=0$ 时,即变为对像素点进行多项式列方向拟合,拟合的多项式变为

$$f_2(y) = \sum_{j=0}^q a_{0j} y^j = a_{00} + a_{01} y + a_{02} y^2 + a_{03} y^3 + \dots + a_{0q} y^q. \quad (18)$$

3.2 逐行多项式曲线拟合抑制耀光

基于最小二乘法的逐行多项式曲线拟合的目的是使离散点的值尽可能靠近拟合函数的值,即使得耀光区域的像素灰度值经过多项式曲线拟合修复后与同一行的其他像素在视觉上保持自然过渡,从而达到抑制耀光的目的。

设 $(1, y_n, z_n)$ 为输入每一行的像素样本, n 表示每行的像素总数, y_n 表示选取的每行像素中各像素所在的列坐标, z_n 表示选取的每一行像素中各像素的灰度值^[16-19]。设拟合的多项式为

$$f_r(y) = a_0 + a_1 \times y + \dots + a_{k-1} \times y^{k-1} + a_k \times y^k, \quad (19)$$

式中: $(a_0, a_1, \dots, a_{k-1}, a_k)$ 为拟合多项式的系数。按照均方误差最小的原则选取拟合曲线,为了使均方误差最小,

$$\min_f \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(y_i) - z_i]^2, \quad (20)$$

式中: δ_i 表示均方误差; $f(y_i)$ 表示多项式计算出来的值; z_i 表示真实的像素灰度值。将(19)式代入(20)式,即可得到

$$\min \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \times y_i + \dots + a_{k-1} \times y_i^{k-1} + a_k \times y_i^k - z_i)^2 \tag{21}$$

通过对(21)式中 $(a_0, a_1, \dots, a_{k-1}, a_k)$ 求偏导数后,令其等于 0,求得所有的系数值,即可得到

$$\begin{cases} 2 \times \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \times y_i + \dots + a_{k-1} \times y_i^{k-1} + a_k \times y_i^k - z_i) = 0 \\ 2 \times \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \times y_i + \dots + a_{k-1} \times y_i^{k-1} + a_k \times y_i^k - z_i) \times y_i = 0 \\ 2 \times \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \times y_i + \dots + a_{k-1} \times y_i^{k-1} + a_k \times y_i^k - z_i) \times y_i^2 = 0 \\ \vdots \\ 2 \times \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \times y_i + \dots + a_{k-1} \times y_i^{k-1} + a_k \times y_i^k - z_i) \times y_i^k = 0 \end{cases} \tag{22}$$

将(22)写成矩阵的形式,得

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i & \dots & \sum_{i=1}^n y_i^{k-1} & \sum_{i=1}^n y_i^k \\ \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n y_i^k & \sum_{i=1}^n y_i^{k+1} \\ \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n y_i^{k+1} & \sum_{i=1}^n y_i^{k+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i^k & \sum_{i=1}^n y_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n y_i^{2k-1} & \sum_{i=1}^n y_i^{2k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{k-1} \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i^2 z_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n y_i^k z_i \end{bmatrix} \tag{23}$$

对(23)式进行化简,得到范德蒙德矩阵形式的表达式:

$$\begin{bmatrix} 1 & y_1 & \dots & y_1^{k-1} & y_1^k \\ 1 & y_2 & \dots & y_2^{k-1} & y_2^k \\ 1 & y_3 & \dots & y_3^{k-1} & y_3^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & y_n & \dots & y_n^{k-1} & y_n^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{k-1} \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \tag{24}$$

记 $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & \dots & y_1^{k-1} & y_1^k \\ 1 & y_2 & \dots & y_2^{k-1} & y_2^k \\ 1 & y_3 & \dots & y_3^{k-1} & y_3^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & y_n & \dots & y_n^{k-1} & y_n^k \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{k-1} \\ a_k \end{bmatrix}$, $\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$, 则(24)式可以简化为

$$\mathbf{Y} \times \mathbf{A}_3 = \mathbf{Z}_2 \tag{25}$$

在(25)式两边同乘 \mathbf{Y} 的转置矩阵,得到

$$\mathbf{Y}^T \times \mathbf{Y} \times \mathbf{A}_3 = \mathbf{Y}^T \times \mathbf{Z}_2 \tag{26}$$

再同时在(26)式两边同时左乘 $\mathbf{Y}^T \mathbf{Y}$ 的逆矩阵,得到

$$\mathbf{A}_3 = (\mathbf{Y}^T \times \mathbf{Y})^{-1} \times \mathbf{Y}^T \times \mathbf{Z}_2 \tag{27}$$

通过直接求解(27)式,可得拟合曲线方程的系数向量 \mathbf{A}_3 ,根据(19)式即可得出拟合的多项式。

逐行多项式拟合去除水面太阳耀光的流程如

图 5 所示。

逐行多项式拟合去除水面太阳耀光的具体步骤为

- 1) 设置阈值 T_2 (根据修复的结果适当调整), 确定要抑制的区域 $R_2 = g (g = 1, 2, 3, \dots, r)$, r 为所要拟合区域的总行数, 选择多项式拟合的次数 k ;
- 2) 首先进行图像抑制区域中第一行像素的拟合, 对第一行像素进行遍历, 寻找出灰度值小于阈值 T_2 的像素所在的列位置 y_{n1} 及灰度值 z_{n1} ;

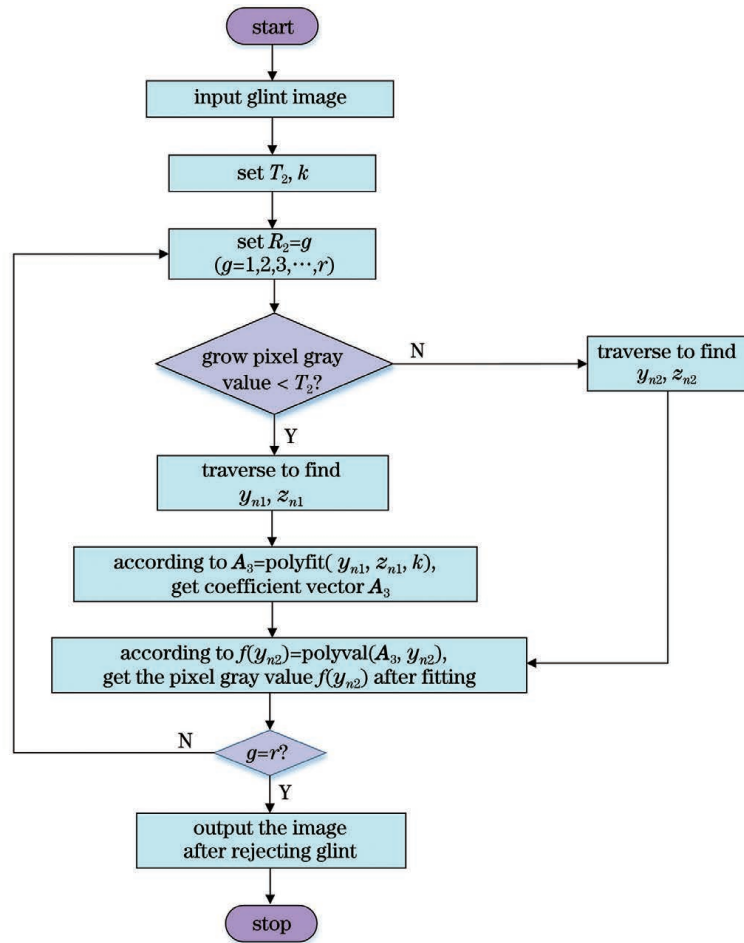


图 5 逐行多项式拟合去除水面太阳耀光的流程

Fig. 5 Flow chart of line-by-line polynomial fitting to remove the sun glint

3) 根据多项式拟合的原理,将步骤 2)得到的像素所在的列位置 y_{n1} 、灰度值 z_{n1} 、多项式拟合次数 k 代入(27)式,得出多项式的拟合系数 A_3 ;

4) 对抑制区域中第一行像素进行遍历,寻找大于等于阈值 T_2 的像素值所在的列位置 y_{n2} 和像素灰度值 z_{n2} ;

5) 将拟合系数 A_3 、拟合次数 k 、大于等于阈值的像素值的列位置 y_{n2} 代入(19)式,初始化并构造多项式方程,即可求出拟合后的像素灰度值 $f_r(y_{n2})$,此值即为对灰度值 z_{n2} 进行抑制后的像素灰度值;

6) 重复步骤 2)~5),逐行进行要抑制区域的多项式拟合操作,直至完成 r 行像素耀光的去除;

7) 最后在图像对比度较低时,进行灰度线性拉伸处理。

4 实验验证

4.1 水域耀光抑制实验

为了验证所提抑制水面太阳耀光方法的有效

性,课题组搭建了室外水面耀光偏振成像实验装置,并在西安邮电大学校园内的人工湖室外水域进行了太阳耀光场景中舰船目标的图像采集实验。将可见光黑白相机固定在三脚架上,正对水域耀光位置进行观测。由于室外水面具有波动性和太阳耀光具有强的偏振特性,因此在水面耀光偏振成像实验装置镜头前安装用于偏振滤光的偏振片,进行图像的采集。可见光黑白相机的分辨率为 $808 \text{ pixel} \times 608 \text{ pixel}$,位深度为 8,帧率为 120 frame/s ,焦距为 8 mm ,像素尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ 。

采用图像均值和标准差、饱和像素数对抑制耀光的结果图像进行量化评价和分析。图像均值体现了整幅图像的亮度分布情况;标准差体现了图像灰度值相对于灰度均值的离散情况;饱和像素数反映了图像的饱和程度,饱和像素数越多,图像的饱和度越大。

4.2 实验结果分析

第一组水面太阳反射耀光图片拍摄于 2020 年 10 月 11 日上午 10 点,水面太阳耀光图像的处理结果如图 6 所示。

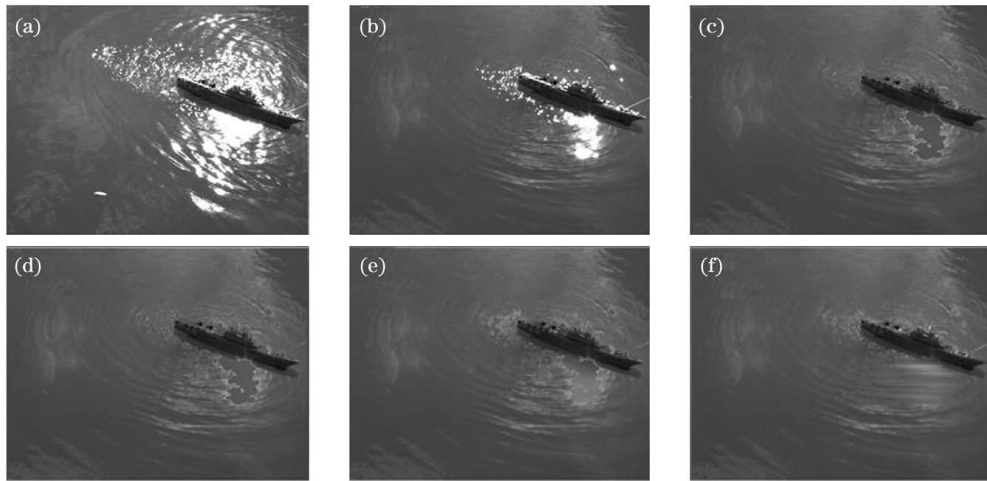


图 6 第一组实验结果。(a)未加偏振滤光的灰度图;(b)偏振滤光的灰度图;(c)多项式行方向曲线拟合得到的图像;(d)多项式列方向曲线拟合得到的图像;(e)多项式曲面拟合得到的图像;(f)逐行多项式拟合去除耀光的图像

Fig. 6 Experimental results of the first group. (a) Gray image without polarization filtering; (b) gray image with polarization filtering; (c) image obtained by polynomial row direction curve fitting; (d) image obtained by polynomial column direction curve fitting; (e) image obtained by polynomial surface fitting; (f) image of line-by-line polynomial fitting to remove glint

图 7 为图 6 对应的直方图。

第二组水面太阳反射耀光图片拍摄于 2020 年 10 月 20 日下午 15 点,水面太阳耀光图像的处理结果如图 8 所示。由于风力的作用,图 8(b)中船的位置

相对于图 8(a)发生了运动,另外图 8(a)和图 8(b)中耀光呈散斑形式存在。

图 9 为图 8 对应的直方图。

表 1 为第一组实验图像质量的评价指标。

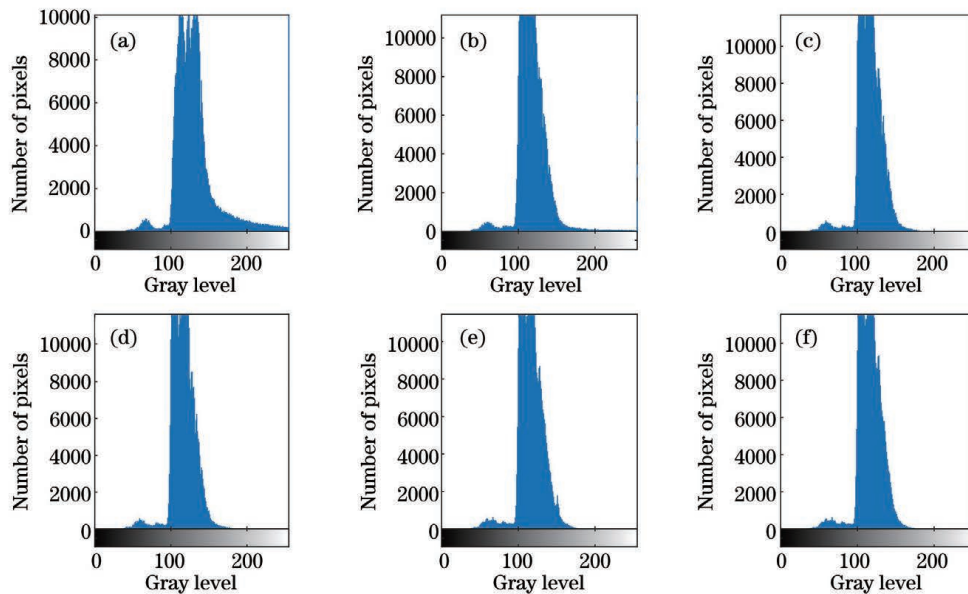


图 7 第一组实验结果对应的直方图。(a)未加偏振滤光的直方图;(b)偏振滤光的直方图;(c)多项式行方向曲线拟合的直方图;(d)多项式列方向曲线拟合的直方图;(e)多项式曲面拟合的直方图;(f)逐行多项式拟合的直方图

Fig. 7 Histograms of experimental results of the first group. (a) Image histogram without polarization filtering; (b) image histogram with polarization filtering; (c) image histogram of polynomial row direction curve fitting image; (d) image histogram of polynomial column direction curve fitting; (e) image histogram of polynomial surface fitting; (f) image histogram of line-by-line polynomial fitting

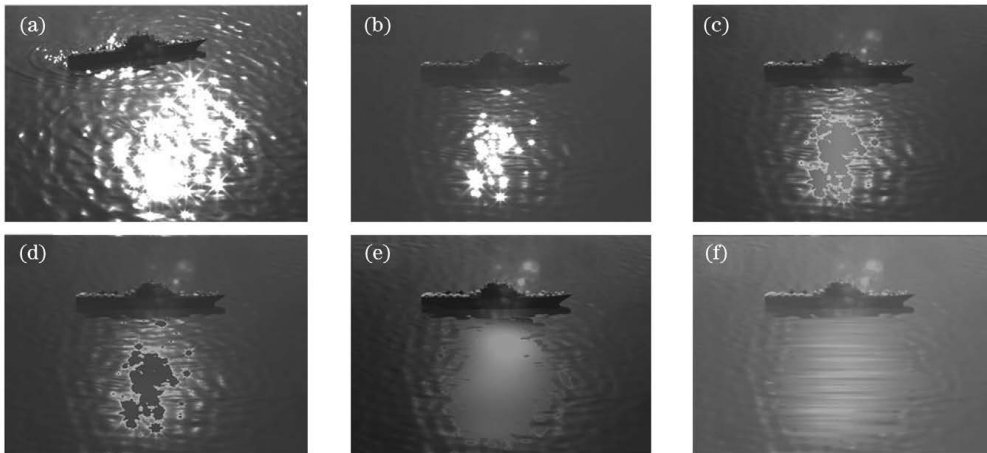


图 8 第二组实验结果。(a)未加偏振滤光的灰度图;(b)偏振滤光的灰度图;(c)多项式行方向曲线拟合得到的图像;(d)多项式列方向曲线拟合得到的图像;(e)多项式曲面拟合得到的图像;(f)逐行多项式拟合去除耀光的图像

Fig. 8 Experimental results of the second group. (a) Gray image without polarization filtering; (b) gray image with polarization filtering; (c) image obtained by polynomial row direction curve fitting; (d) image obtained by polynomial column direction curve fitting; (e) image obtained by polynomial surface fitting; (f) image of line-by-line polynomial fitting to remove glint

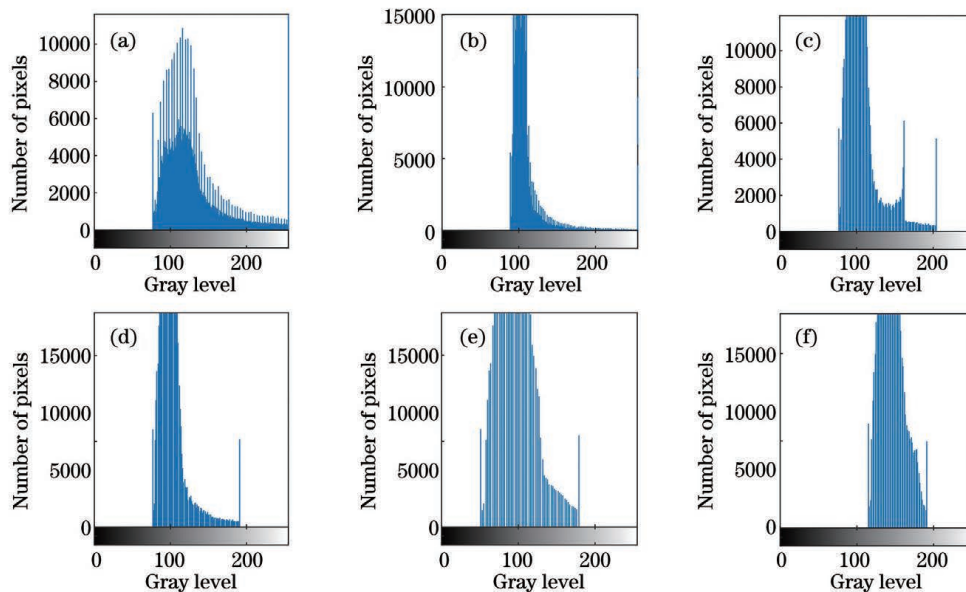


图 9 第二组实验结果对应的直方图。(a)未加偏振滤光的直方图;(b)偏振滤光的直方图;(c)多项式行方向曲线拟合的直方图;(d)多项式列方向曲线拟合的直方图;(e)多项式曲面拟合的直方图;(f)逐行多项式拟合的直方图

Fig. 9 Histograms of experimental results of the second group. (a) Image histogram without polarization filtering; (b) image histogram with polarization filtering; (c) image histogram of polynomial row direction curve fitting image; (d) image histogram of polynomial column direction curve fitting; (e) image histogram of polynomial surface fitting; (f) image histogram of line-by-line polynomial fitting

表 2 为第二组实验图像质量的评价指标。

从第一组实验结果和第二组实验结果可以看出:图像平均灰度值由上至下逐渐递减,原始图像对耀光没有进行抑制,平均灰度值最大,出现大区域面积的太阳耀光,耀光处及周围的像素灰度值主要分布在 180~255 之间,目标几乎被耀光淹没,目标轮

廓不清晰,细节信息损失严重;相比于原图,加偏振滤片进行偏振滤光后的图像平均灰度值减小,说明耀光得到了一定的抑制,但是没有彻底消除掉;相比偏振滤光后的图像,偏振滤光和曲面列方向多项式拟合、偏振滤光和曲面行方向多项式拟合、偏振滤光和二元多项式曲面拟合后的图像的平均灰度值减小,

表 1 第一组实验图像质量的评价指标

Table 1 Image quality evaluation indexes of the first group of experiments

Image	Mean gray	Standard deviation	Number of saturated pixels
Fig. 7(a)	137.4556	39.2726	27537
Fig. 7(b)	119.7173	25.3933	7037
Fig. 7(c)	115.9091	16.1304	0
Fig. 7(d)	115.7121	15.5516	0
Fig. 7(e)	115.6268	15.5440	0
Fig. 7(f)	114.3132	15.3691	0

表 2 第二组实验图像质量的评价指标

Table 2 Image quality evaluation indexes of the second group of experiments

Image	Mean gray	Standard deviation	Number of saturated pixels
Fig. 9(a)	141.4537	38.7123	57140
Fig. 9(b)	110.5268	28.8762	11289
Fig. 9(c)	108.2020	24.1576	0
Fig. 9(d)	103.4127	19.8926	0
Fig. 9(e)	98.1747	17.1200	0
Fig. 9(f)	96.2230	16.7501	0

但是得到的耀光抑制区域呈现灰色片状或者黑色片状,并且目标细节丢失严重,抑制效果较差;偏振滤光结合逐行多项式拟合得到的图像平均灰度值最小,且不包含饱和像素,图像亮度更加均匀,目标细节信息更清晰,说明逐行多项式拟合对太阳耀光的抑制效果最佳。各图像的标准差由上至下也逐渐减小,偏振滤光和逐行多项式拟合联合抑制得到的第一组图像标准差相比于仅进行偏振滤光的一些减少了 10.0242,第二组减少了 12.1261,说明偏振滤光结合逐行多项式拟合得到的图像灰度离散度较小,亮度均匀性明显高于其他各图。原始图像饱和像素数最多,饱和度最大;偏振滤光后的饱和像素数减少,饱和度也相对减少;偏振滤光和多项式拟合联合得到的图像不包含饱和像素值,说明对耀光进行了很好抑制。通过对两组实验所使用的 4 种方法去除耀光的评价指标进行分析,得出偏振滤光结合逐行多项式拟合的方法去除耀光的效果最好。

5 结 论

水面太阳耀光的干扰通常会使传感器饱和,根据太阳耀光的强偏振特性,提出了一种偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法。该实验通过在相机前端成像光路中加入偏振片进行偏振滤光

抑制,后端对偏振滤光后的图像进行多项式拟合处理,以实现耀光的抑制。在室外水域对所提方法进行验证实验,实验结果表明,偏振滤光与逐行多项式拟合联合抑制水面耀光的方法能够有效去除耀光,获得的图像不包含饱和像素,图像亮度更加均匀,目标细节信息更清晰,去除耀光效果最佳。多项式拟合的最佳阶数的选取与场景、波浪起伏的周期规律、太阳方位、风速等多个因素有关,问题较为复杂,对于最佳阶数的选取问题后续值得深入研究。此外,后续工作中将尝试采用深度学习算法来实现对偏振辐射图的耀光抑制,以期达到更好的太阳反射耀光去除效果,获得更好的成像效果。

参 考 文 献

- [1] Yang Y F, Jing L H, Yang S K, et al. Research and analysis of imaging algorithm for visible light camera of space target [J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(4): 71-76.
杨逸峰, 井丽红, 杨世坤, 等. 空间目标可见光相机的成像算法研究与分析 [J]. 飞控与探测, 2019, 2(4): 71-76.
- [2] 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.
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.
- [3] Pan D L. Research on radiation simulation image of ocean aqua satellite[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1997, 19(6): 43-55.
潘德炉. 海洋水色卫星的辐射模拟图像研究[J]. 海洋学报, 1997, 19(6): 43-55.
- [4] Zhao N Z, Zhao Y S. Further study on sun glitter's peeling-off of multi-angle polarized remote sensing[J]. Optical Technique, 2007, 33(6): 932-934, 937.
赵乃卓, 赵云升. 多角度偏振遥感中太阳耀光剥离的深入研究[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 932-934, 937.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): S117001.
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): S117001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Mao Z H, Guo D F, Pan D L. A study of sun glitter obtaining and removing in air borne ocean color remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1996, 11(4): 15-20.
毛志华, 郭德方, 潘德炉. 航空水色遥感中太阳耀光信息提取及消除方法的研究[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(4): 15-20.
- [11] Chen X F, Gu X F, Cheng T H, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint[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.
- [12] Lynch D K, Dearborn D S, Lock J A. Glitter and glints on water[J]. Applied Optics, 2011, 50(28): F39-F49.
- [13] Shaw J A, Vollmer M. Bluesun glints on water viewed through a polarizer[J]. Applied Optics, 2017, 56(19): G36-G41.
- [14] Li E T, Zhang G X, Zeng H. Algorithm of surface fitting research based on least-squares methods[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2009, 29(2): 48-51.
李二涛, 张国焯, 曾虹. 基于最小二乘的曲面拟合算法研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2009, 29(2): 48-51.
- [15] Shao X H, Lu Z C, Wang Z. Temperature compensation algorithm based on leastsquares curve fitting in flow measurement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(6): 897-902.
邵仙鹤, 鲁志成, 王翥. 基于最小二乘曲面拟合的流量计量温度补偿算法[J]. 传感技术学报, 2016, 29(6): 897-902.
- [16] Zhang Y T, Jia Y M. Analysis and program implementation of least squares polynomial curve fitting[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(4): 637-639, 654.
张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(4): 637-639, 654.
- [17] Lu Z G, He P, Zhi L J, et al. Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 853-858.
卢治功, 贺鹏, 职连杰, 等. 基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 853-858.
- [18] Xue L H, Li D P. Research on piecewise linear fitting method based on least square method in 3D space points[J]. The Open Automation and Control Systems Journal, 2015, 7(1): 1575-1579.
- [19] Kaplan A G, Kaplan Y A. Developing of the new models in solar radiation estimation with curve fitting based on moving least-squares approximation[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 2462-2471.