文章编号 1004-924X(2019)12-2555-09

采用双三次插值的空间目标偏振成像

马 岩[1*],张超子[2,3],刘 也[1],张 哲[2,3]
(1.北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094;
2.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了解决暗弱场景下空间目标与背景对比度过低,无法区分的问题,采用分焦面偏振成像系统分别对室外暗弱场景、室内空间模拟环境进行成像;为了弥补分焦面偏振成像系统图像分辨率下降的缺点,采用双三次插值算法进行上采样。通过分焦面偏振相机的一次曝光便可获得 4 个不同偏振角度下的光强图,进而解算出偏振度图像和偏振角图像,并与传统的光强图像进行对比;利用双三次插值算法对 4 幅光强图进行上采样提高图像分辨率,然后再解算出偏振度图像,与未通过上采样获得的偏振度图像进行对比。实验结果表明,偏振成像较之传统的光强成像,目标的对比度获得了提高,边缘信息、纹理信息得到了更好的展现,偏振度图像与光强图像相比,与对比度有关的 EME 指标至少提高了 17%,双三次插值算法提高了成像分辨率。应用双三次插值算法的分焦面偏振成像系统,对暗弱场景下的空间目标的识别具有潜在的应用价值。

关 键 词:偏振成像;空间目标;分焦面型;双三次插值
中图分类号:O436.3;TP394.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20192712.2555

Polarization imaging of space target based on bicubic interpolation

MA Yan[1*], ZHANG Chao-zi[2,3], LIU Ye[1], ZHANG Zhe[2,3]

(1. *Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing* 100094, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: mayan888@sina.com*

Abstract: To solve the problem in which the contrast between a space target and its background is too low to be distinguished in a dark scene, the focal-plane array polarization imaging system is used to image the outdoor dark scene and the indoor space simulation environment. At the same time, to compensate for the shortcomings of the decreased resolution of the focal-plane array polarization imaging system, the bicubic interpolation algorithm is used for upsampling. On one hand, the intensity image under four different polarization angles can be obtained by a single exposure of the focal-plane array polarizer camera, then, the Degree of Polarization (DOP) and the Angle of Polarization (AOP) images are compared to the intensity image. On the other hand, the bicubic

收稿日期:2019-09-05;**修订日期**:2019-10-16.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61890965)

interpolation algorithm is used to upsample the four intensity images to improve the image resolution and then, calculate the DOP image compared with the DOP image obtained without the upsampling procedure. The experimental results show that compared with traditional intensity imaging, the contrast of the target is improved, the edge information and texture information are better displayed by imaging polarimetry, and the final imaging resolution is improved by the bicubic interpolation algorithm. The measure of enhancement (EME), a contrast evaluation index, is approximately 17% more in the DOP image than in the intensity image, proving that the focal plane polarization imaging system using a bicubic interpolation algorithm has potential application value for the identification of space targets in the dark scenes.

Key words: polarization imaging; space target; focal-plane array; bicubic interpolation

1 引　言

偏振作为光的特性之一，是除振幅、波长、相位以外的又一重要属性，偏振信息可以应用于目标探测领域[1]。由于人造物体和自然物体表面材料和粗糙度的区别，较之于传统探测技术，偏振成像探测技术可以获得更多维度的信息，提高了目标探测的识别能力。

1991 年，Beavers 等人利用空间目标的偏振态信息对空间目标的材料和光学特性进行了分析[2]。2001 年，Sanchez 等人在美国星火靶场，利用地基大口径望远镜对地球同步轨道卫星进行观测，对地基望远镜观测空间目标偏振特性进行了初步探索[3]。2002 年，Bush 等人利用 TASAT 模型对近地轨道卫星的偏振特性进行了仿真研究，并与实际观测情况比对，进一步说明了空间目标的偏振信息对空间目标辨识的作用[4]。受诸多因素的影响，国外对基于偏振信息的空间目标辨识的研究未完全公开，而国内对空间目标偏振特性的研究起步较晚，且实验条件相对落后，多为地面模拟实验，模拟实验环境较为粗糙。2013 年，上海技术物理所李范鸣等人在实验室环境下，研究了材料、材料表面粗糙度、观测角对空间目标红外偏振特性的影响[5]。2017 年，西安光机所袁博等人对 4 种空间目标的常用材料进行了实验研究，综合光强、光谱、偏振度和偏振角等多维度信息，对它们进行区分[6]。2018 年，西安光机所庞树霞等人根据观测距离的不同，提出了综合利用光度信息和偏振信息对空间目标进行天基观测的方案，并通过实验研究验证了方案的可行性[7]。

偏振成像系统主要有分时型、分孔径型、分振幅型和分焦面型 4 种[8-10]。分焦面偏振成像与分时偏振成像相比具有实时成像的优点，与分振幅、分孔径偏振成像相比具有结构紧凑，稳定性高的优点。本文采用分焦面偏振成像探测系统，对室外暗场景、室内空间模拟环境进行成像。较之传统的光强成像，偏振成像能够提供更多维度的信息，提高图像对比度，增强图像的边缘、纹理信息。同时，针对分焦面型偏振成像降分辨率的缺点，采用双三次插值算法[11]进行上采样，取得了较好的效果。

2 基本原理

2.1 斯托克斯矢量

偏振光的表示方法主要有琼斯矢量和斯托克斯矢量两种[12]。其中，斯托克斯矢量的应用较为广泛，其形式是一个含有 4 个元素的列向量，定义为：

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I_0+I_{90} \\ I_0-I_{90} \\ I_{45}-I_{135} \\ I_{\mathrm{RCP}}-I_{\mathrm{LCP}} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

其中：I_0，I_{45}，I_{90}，I_{135}分别表示 0°，45°，90°，135°方向上的偏振光的光强，I_{RCP}，I_{LCP}分别表示左旋圆偏振光、右旋圆偏振光的光强。值得注意的是，$I=I_0+I_{90}$表示的是光强，是探测器可测得的。

在获得斯托克斯矢量后，可以计算偏振度(Degree of Polarization，DOP)、偏振角(Angle of Polarization，AOP)，公式如下：

$$DOP=\frac{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}{I}, \tag{2}$$

$$AOP=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \tag{3}$$

2.2　斯托克斯矢量的获取

在自然条件下，圆偏振光的分量通常很小，因此斯托克斯矢量中的 V 可忽略不计，只求取其余 3 个分量即可。

一束光通过光学元件后，出射光的偏振态较之入射光的偏振态会发生变化。穆勒矩阵用来描述光学元件对光的偏振态的影响，定义为：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

一束光通过光学系统，入射光的斯托克斯矢量 $\boldsymbol{S}_{\text{in}}$，出射光的斯托克斯矢量 $\boldsymbol{S}_{\text{out}}$，光学系统的穆勒矩阵 $\boldsymbol{M}$，三者之间的关系如下：

$$\boldsymbol{S}_{\text{out}}=\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{S}_{\text{in}}. \tag{5}$$

实验条件下，通常让光通过线偏振器，利用线偏振器检偏。理想的线偏振器的穆勒矩阵[13]为：

$$\boldsymbol{M}_{\text{L}}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha\cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha\cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{6}$$

其中 α 为线偏振器与透光轴方向与参考方向的夹角。于是有：

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix}= \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha\cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha\cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \tag{7}$$

将关注点放在 I' 的求取上，则得到：

$$I'=\frac{1}{2}(I+\cos 2\alpha\cdot Q+\sin 2\alpha\cdot U). \tag{8}$$

在实验中，转动线偏振器，测得至少 3 个不同 α 角度下的光强 I'，则 I,Q,U 可解，进而求得入射光的斯托克斯矢量。

2.3　分焦面偏振成像

分焦面偏振成像技术是将微偏振阵列置于像素阵列之前。如图 1 所示，微偏振阵列由 0°，45°，90°，135° 4 个方向的微小线偏振器件按照一定顺序排列构成[14]。通过一次曝光成像，便可获得 4 个角度下的光强，由式(8)可得：

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(I+Q)=I'(0°) \\ \frac{1}{2}(I+U)=I'(45°) \\ \frac{1}{2}(I-Q)=I'(90°) \\ \frac{1}{2}(I-U)=I'(135°) \end{cases}. \tag{9}$$

进而有：

$$\begin{cases} I=\frac{1}{2}[I'(0°)+I'(45°)+I'(90°)+I'(135°)] \\ Q=I'(0°)-I'(90°) \\ U=I'(45°)-I'(135°) \end{cases}. \tag{10}$$

分焦面偏振成像虽然具有结构紧凑、稳定性高等优点，但是以牺牲分辨率为代价。原始图像的分辨率假设为 $n\times n$，处理后得到的偏振图像的分辨率只有 $\frac{n}{2}\times\frac{n}{2}$，同时每个单元存在至少一个像素的匹配误差。

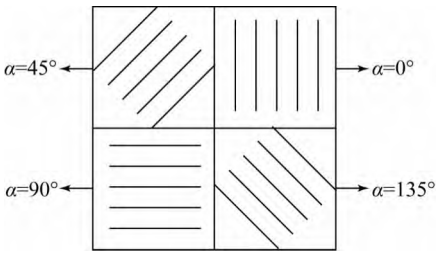


图 1　微偏振阵列单元

Fig. 1　Units of focal-plane array polarizer

2.4　双三次插值算法

为了解决分焦面偏振成像分辨率下降，存在像素匹配误差的问题，本文采用双三次插值方法对 4 个角度下的光强图像 I' 进行上采样，然后再利用式(2)、式(3)和式(10)进行偏振度图像和偏振角图像的求解，通过上采样操作使处理后的偏

振图像的分辨率仍为 $n\times n$，且对空缺像素的估算在一定程度上改善了像素的匹配误差。

双三次插值需要利用 BiCubic 函数作为基函数[15]，BiCubic 函数表达式如下：

$$W(x)=\begin{cases}(a+2)|x|^3-(a+3)|x|^2+1, & |x|\leqslant 1\\ a|x|^3-5a|x|^2+8a|x|-4a, & 1<|x|<2,\\ 0, & \text{其他}\end{cases}\tag{11}$$

其中 $a=-0.5$。BiCubic 函数如图 2 所示。

将上采样图像中需要估算的像素点缩放到原始图像中，得到的对应的像素点是亚像素级的，如图 3 中的点 P，P 点的像素值需要 P 点周围的整数点位置的 16 个像素估算。这 16 个像素的权重各不相同，由 P 点到它的距离决定，距离越小，权重越大。估算公式为：

$$f(P)=\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}f(G_{ij})\cdot W(u_{ij})W(v_{ij}),\tag{12}$$

其中：G_{ij} 为整数位置像素点，u_{ij} 为 P 与 G_{ij} 的纵向距离，v_{ij} 为 P 与 G_{ij} 的横向距离，f 表示该点的像素值，W 表示 BiCubic 函数。

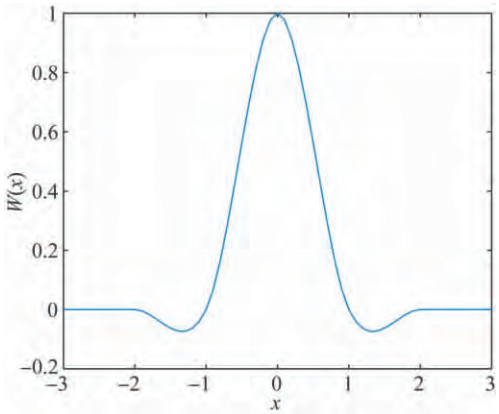


图 2　BaCubic 函数图像

Fig. 2　BiCubic function image

如图 3 所示，以 G_{00} 点为例，P 到它的纵向距离为 u，横向距离为 v，则 G_{00} 点的像素的权重为 $\boldsymbol{W}(u)\boldsymbol{W}(v)$，以此类推获得 16 个整数位置像素的权重，进而对 P 的像素值进行估计，从而完成对光强图像 I' 的上采样估计。

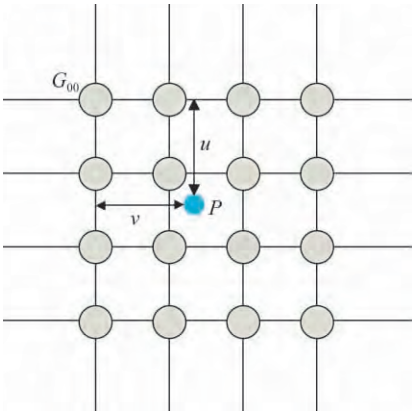


图 3　双三次插值算法示意图

Fig. 3　Schematic diagram of bicubic interpolation algorithm

3　实验系统

分焦面偏振成像系统的相机采用 4D Technology 公司的像素级偏振相机 PolarCam，如图 4 所示，该相机靶面为 1 000×1 000，实验中，像素深度设置为 12 bit。分焦面偏振成像系统的镜头采用 Nikon 的 AF-S DX Nikkor 55～200 mm f/4-5.6 G ED VR II 型远摄变焦镜头。图像处理程序采用 Matlab2016b 编写，用于图像处理的计算机 CPU 为 i7-6820HQ，内存为 16 G。



图 4　分焦面偏振成像实验所用的相机与镜头

Fig. 4　Camera and len used in polarization imaging experiment

实验时拍摄了 4 个场景，场景 1 为傍晚光线条件较差时灌木丛中的迷彩小车；场景 2 为傍晚光线条件较差时写字楼的窗口；场景 3、场景 4 为室内仅单一平行光源照明下的卫星模型。其中场景 3、场景 4 在一个完全密闭的暗室中进行，采用人造光源

进行照明，光源发出的光经过扩束整形变为平行光，照亮卫星模型。卫星模型如图 5 所示。

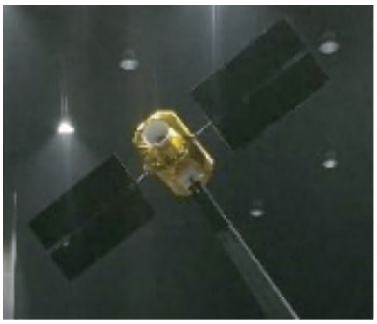


图 5　卫星模型

Fig. 5　Satellite model

4　测量实验与结果

在场景 1 中，对草地上的铁质小车和橡胶垫进行拍摄，拍摄结果如图 6 所示。图 6(a)所示为光强图像，图 6(b)所示为偏振度图像，图 6(c)所示为偏振角图像。可以看出，由于光线较暗，光强图像中仅能依稀辨认出铁质小车和橡胶垫的轮廓，看不清具体细节，甚至不能分辨其具体是何物。偏振度图像和偏振角图像则含有较多的细节信息，可以看出小车的具体构造，甚至是小车车身上的字。



(a)场景 1 光强图像
(a)Intensity image in scene one

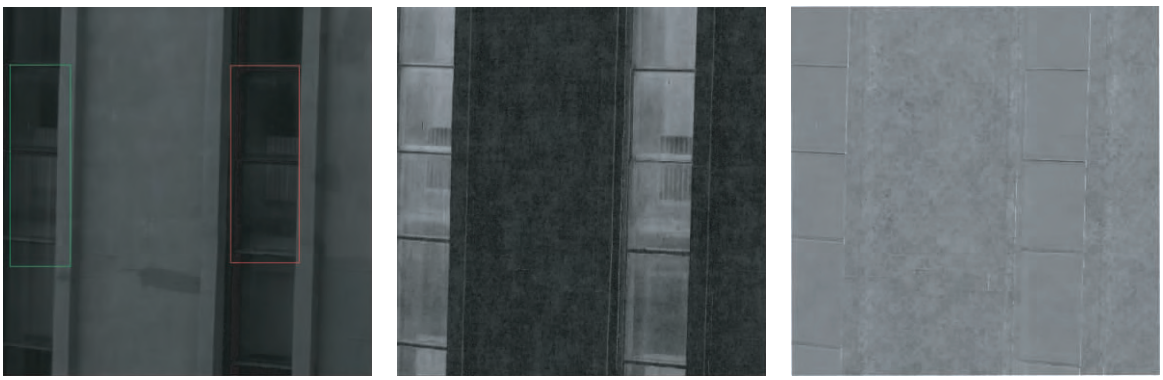
(b)场景 1 偏振度图像
(b)DOP image in scene one

(c)场景 1 偏振角图像
(c)AOP image in scene one

图 6　场景 1 的成像结果

Fig. 6　Intensity and polarized images of scene one

在场景 2 中，对建筑物的窗户进行拍摄，拍摄结果如图 7 所示。光强图像中，只能看见窗户表面，而偏振度图像则能够透过窗户观察到屋子里的情况，屋子里的暖气装置清晰可见。这也印证了偏振成像的“去雾”特性[16]。



(a)场景 2 光强图像
(a)Intensity image in scene two

(b)场景 2 偏振度图像
(b)DOP image in scene two

(c)场景 2 偏振角图像
(c)AOP image in scene two

图 7　场景 2 的成像结果

Fig. 7　Intensity and polarized images of scene two

在场景 3 中，对卫星模型的远景进行了拍摄，拍摄结果如图 8 所示。从光强图 8(a)中可以看出，由于室内是全黑环境，单一平行光照射，光强较弱，卫星模型的翻板在光强图像中是不可见的，但是在偏振度图像 8(b)、偏振角图像 8(c)中，翻板清晰可见，甚至翻板上的细节也是可辨识的。



(a)场景 3 光强图像
(a)Intensity image in scene three

(b)场景 3 偏振度图像
(b)DOP image in scene three

(c)场景 3 偏振角图像
(c)AOP image in scene three

图 8　场景 3 的成像结果

Fig. 8　Intensity and polarized images of scene three

在场景 4 中，对卫星模型的近景进行了拍摄，拍摄结果如图 9 所示。与场景 3 相比，场景 4 虽然是近景拍摄，但是受平行光光线角度的影响，在光强图像 9(a)中，卫星模型的主体基本看不清，仅有部分较亮的反光点。但是在偏振度图像 9(b)中，卫星模型的主体部分则比较清晰，既有低频的轮廓信息，也有高频的细节信息；在偏振角图像 9(c)中，卫星模型翻板的轮廓有比较好的展现。



(a)场景 4 光强图像
(a)Intensity image in scene four

(b)场景 4 偏振度图像
(b)DOP image in scene four

(c)场景 4 偏振角图像
(c)AOP image in scene four

图 9　场景 4 的成像结果

Fig. 9　Intensity and polarized images of scene four

除却对图像的主观评价，本文引入两种图像客观标准 EME[17-18] 和灰度共生矩阵[19]，两种均属于无参考的图像质量评价标准。其中，EME 用于评价图像的对比度，灰度共生矩阵用于评价图像的纹理特征。

EME 是评价图像增强算法的一项指标，它和图像对比度有关，EME 值越大，证明图像的对比度越大，所采用的图像增强算法越好。EME 的公式如下：

$$EME = \left| \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_2} 20\log \frac{I^{w}_{\max;i,j}(\Phi)}{I^{w}_{\min;i,j}(\Phi) + t} \right|, \tag{13}$$

其中：k_1，k_2 代表将图像的横向、纵向分别分为 k_1 份，k_2 份，则整个图像被分为 $k_1 k_2$ 份，$I^{w}_{\max;i,j}(\Phi)$ 代表 (i,j) 块中的像素最大值，$I^{w}_{\min;i,j}(\Phi)$ 代表 (i,j) 块中的像素最小值，t 是一个极小值，防止公

式中的分母为 0。

取 4 个场景中本文感兴趣的区域（方框区域），即存在目标的区域，计算光强图像、偏振度图像、偏振角图像的 EME 指标。计算 EME 之前，先将 3 幅图像的像素值做归一化处理。计算 EME 时，k_1，k_2 均取 10，将感兴趣区域分为 100 份，t 值取 0.000 01，计算结果如表 1 所示。

表 1　4 个场景中光强图像、偏振度图像和偏振角图像的 EME 指标

Tab. 1　EME index of light intensity image, DOP image and AOP image in four scenes

EME	光强图像	偏振度图像	偏振角图像
场景 1 中的小车（方框区域）	36.65	77.40	78.39
场景 2 中的窗口（方框区域）	21.55	37.34	10.59
场景 3 中的翻板（方框区域）	28.14	185.74	5.43
场景 4 中的主体（方框区域）	48.92	56.86	9.02

从表 1 中可以看出：就偏振度图像而言，在 4 个场景中，偏振度图像与光强图像对比，其 EME 指标均有提高。其中以场景 3 最为显著，偏振度图像的 EME 指标是光强图像的 6.60 倍；场景 4 虽然较低，仅为 1.17 倍，但场景 4 中，偏振度图像对于主观视觉的提升效果较好，由此可见，客观指标只能反映一个方面的问题。

就偏振角图像而言，在 4 个场景中，偏振角图像与光强图像对比，场景 1 的 EME 有着显著提高，甚至优于偏振度图像，在视觉上的感受也是如此；但在场景 2、场景 3、场景 4 中，偏振角图像的 EME 指标要小于光强图像。通过分析可知，因为偏振角对于高频纹理信息比较敏感，场景 1 中的小车、草地高频信号居多，而在场景 2、场景 3、场景 4 中窗口、卫星翻板、卫星主体以低频轮廓信息为主，所以在某些场景中，偏振角图像提供的信息要优于光强图像、偏振度图像。由此可知，针对不同的暗弱目标，可以综合利用偏振度信息和偏振角信息。

灰度共生矩阵由两个参数决定，分别是方向和步长，针对一幅图像，选定了特定的方向和步长后便可得到一个灰度共生矩阵。当然该灰度共生矩阵只能反映此方向和步长下的纹理特征，这是由纹理特征的复杂性决定的。一个灰度共生矩阵共有 14 个特征值，每一个特征值都在不同程度上反映了图像的纹理信息，本文选择“Contrast”和“Energy”两个特征说明图像的纹理信息。其中，“Contrast”反映了图像的清晰度和纹理沟纹的深浅，“Contrast”越大，图像越清晰，纹理越深；“Energy”则反映了灰度分布的均匀程度和纹理的粗细，“Energy”越小，灰度分布越均匀，纹理越细。

与计算 EME 指标相同，取 4 个场景中感兴趣的区域（方框区域），计算光强图像、偏振度图像、偏振角图像的“Contrast”和“Energy”特征，结果如表 2 所示。其中，生成灰度共生矩阵时，方向选择 0°，步长选为 1。

表 2　4 个场景中光强图像、偏振度图像和偏振角图像的“Contrast”和“Energy”指标

Tab. 2　Contrast and energy indexes of light intensity image, DOP image and AOP image in four scenes

场景	指标	光强图像	偏振度图像	偏振角图像
场景 1 中的小车	Contrast	0.829 0	4.456 8	17.065 4
（方框区域）	Energy	0.091 8	0.03 79	0.012 8
场景 2 中的窗口	Contrast	0.298 0	1.796 3	0.337 4
（方框区域）	Energy	0.187 6	0.038 5	0.452 0
场景 3 中的翻板	Contrast	0.000 9	1.358 8	1.074 8
（方框区域）	Energy	0.997 0	0.104 9	0.097 9
场景 4 中的主体	Contrast	0.355 3	3.006 1	1.588 2
（方框区域）	Energy	0.951 9	0.061 7	0.072 1

由于纹理特征的表征过于复杂，这里选取方向为 0 度，步长为 1 的灰度共生矩阵，仅能代表纹理特征的一个方面，但作为评价指标是具有代表性的。

由表 2 可以看出，就“Contrast”而言，所有偏振度图像、偏振角图像均大于光强图像，说明偏振度图像、偏振角图像较之于光强图像，纹理沟纹更深，图像更清晰；就“Energy”而言，除了场景 2 的偏振角图像（特定场景下），所有偏振度图像、偏振角图像均小于光强图像，说明偏振度图像、偏振角图像的纹理更细，能够得到纹理的更多细节信息。

以场景 3 为例说明双三次插值算法的作用。图 10 是通过双三次插值获得 4 幅高分辨率光强图像后，进而解算出的偏振度图像，图 11 是不经过插值算法直接解算得到的偏振度图像。本质上，图 10 是对图 11 更高分辨率的估算，它在保留信息的基础上扩大分辨率，并没有出现明显的马赛克失真。



图 10　经过插值算法获得的偏振度图像，图像分辨率为 1 000×1 000 像素

Fig. 10　DOP image obtained by interpolation algorithm with resolution of 1 000×1 000 pixels



图 11　不经过插值算法获得的偏振度图像，图像分辨率为 500×500 像素

Fig. 11　DOP image obtained without interpolation algorithm with resolution of 500×500 pixels

5　结　论

针对暗弱场景下，目标与背景的对比度过低，不易区分的问题，本文采用分焦面偏振成像系统对暗弱场景下的目标进行探测。实验结果表明，分焦面偏振成像系统能够提供除光强以外的更多维度的信息。主观视觉上，与光强图像相比，偏振度图像提高了目标与背景的对比度，偏振角图像给出了更多的场景的边缘和纹理信息，均在不同程度上提升了视觉效果。客观评价上，利用 EME 指标对图像对比度进行评价，在实验的 4 幅场景中，偏振度图像的 EME 指标均高于光强图像，至少提高了 17%；偏振角图像应用在高频信息较多的场景中时，其 EME 指标也有显著提高。利用灰度共生矩阵的“Contrast”和“Energy”指标对图像的纹理信息进行评价，除了个别的特定场景，偏振度图像、偏振角图像的纹理信息均比光强图像有着不同程度的提高。最后，结合双三次插值算法的分焦面偏振成像系统与无插值算法的系统相比，在保留原有信息的基础上，提高了最终的成像分辨率。

参考文献：

[1] ZALLAT J, GRABBLING P, TAKAKURA Y. Using polarimetric imaging for material classification [C]. *Proceedings* 2003 *International Conference on Image Processing*, *IEEE*, 2003: II-827.

[2] BEAVERS W I, TAPIA S, CHO J Y K. Photopolarimetric studies of resident space objects[C]. *Lunar and Planetary Science Conference*. 1991, 22: 67-68.

[3] SANCHEZ D J, GREGORY S A, STORM S L, *et al*.. Photopolarimetric measurements of geosynchronous satellites[C]. *Multifrequency Electronic/Photonic Devices and Systems for Dual-Use Applications*. *International Society for Optics and Photonics*, 2001, 4490: 221-237.

[4] BUSH K A, CROCKETT G A, BARNARD C C. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model[C]. *Polarization Analysis and Measurement IV*. *International Society for Optics and Photonics*, 2002, 4481: 46-58.

[5] 李范鸣，牛继勇，马利祥. 基于红外偏振特性的空间目标探测可行性探讨 [J]. 应用光学, 2013, 34(4): 653-657.
LI M F, NIU J Y, MA L X. Feasibility analysis of space target detection based on infrared polarization properties [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 653-657. (in Chinese)

[6] 袁博，高静，杨凡超，等. 空间目标材料偏振光学特性研究 [J]. 光子学报, 2017, 46(1): 0116003-1-0116003-8.
YUAN B, GAO J, YANG F CH, *et al*.. Research on Polarized Optical Properties of Space Target Material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 46(1): 0116003-1-0116003-8. (in Chinese)

[7] 庞树霞. 基于光度与偏振信息的天基空间碎片探测方法研究[D]. 西安：中国科学院西安光学精密机械研究所，2018.
PANG S X. *Space-based Detection of Space Debris by Photometric and Polarimetric Characteristics* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2018. (in Chinese)

[8] 刘敬，夏润秋，金伟其，等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展 [J]. 光学技术，2013，39(1)：56-62
LIU J, XIA R Q, JIN W Q, *et al*.. Review of imaging polarimetry based on Stokes vector [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(1): 56-62. (in Chinese)

[9] 张哲，刘欣悦，王建立，等. 分时型长波红外高帧频偏振成像实验研究 [J]. 液晶与显示，2019，34(5)：508-514.
ZHANG ZH, LIU X Y, WANG J L, *et al*.. Division-of-time long-wave infrared high frame frequency polarization imaging experiment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(5): 508-514. (in Chinese)

[10] 韩勇，赵开春，尤政. 快速旋转式偏振成像探测装置的设计 [J]. 光学 精密工程，2018，26(10)：2345-2354.
HAN Y, ZHAO K CH, YOU ZH. Development of rapid rotary polarization imaging detection devices [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2345-2354. (in Chinese)

[11] 张阿珍，刘政林，邹雪城，等. 基于双三次插值算法的图像缩放引擎的设计 [J]. 微电子学与计算机，2007，24(1)：49-51.
ZHANG A ZH, LIU ZH L, ZOU X CH, *et al*.. Design of image scaling engine based bicubic interpolation algorithm [J]. *Microelectronics & Computer*, 2007, 24(1): 49-51. (in Chinese)

[12] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京：科学出版社，2003.
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[13] GENDRE L, FOULONNEAU A, BIGUE L. Imaging linear polarimetry using a single ferroelectric liquid crystal modulator [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 4687-4699.

[14] HARNETT C K, CRAIGHEAD H G. Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1291-1296.

[15] GAO S, GRUEV V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26161-26173.

[16] 梁健，巨海娟，张文飞，等. 偏振光学成像去雾技术综述 [J]. 光学学报，2017(4)：9-21.
LIANG J, JU H J, ZHANG W F, *et al*.. Review of optical polarimetric dehazing technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(4): 9-21. (in Chinese)

[17] AGAIAN S S, PANETTA K, GRIGORYAN A M. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 10(3): 367-382.

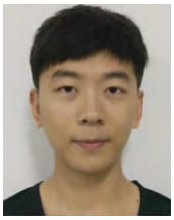
[18] 范之国，宋强，代晴晴，等. 全局参数估计的水下目标偏振复原方法 [J]. 光学 精密工程，2018，26(7)：1621-1632.
FAN ZH G, SONG Q, DAI Q Q, *et al*.. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1621-1632. (in Chinese)

[19] SOH L K, TSATSOULIS C. Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices [J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 1999, 37(2): 780-795.

作者简介：



马　岩(1977－)，男，山东单县人，硕士，副研究员，2002 年于北京跟踪与通信技术研究所获得硕士学位，主要从事目标测量与特征提取、信息融合处理与分析、数据计算技术的研究。E-mail：mayan888@sina.com



张超子(1993－)，男，吉林长春人，博士研究生，2016 年于天津大学获得学士学位，主要从事光谱成像技术的研究。E-mail：chaozi_zhang@qq.com