

基于 Mueller 矩阵的偏振抑制反光方法

王佳林¹, 段锦^{1*}, 付强², 谢国芳¹, 莫苏新¹, 方瑞森¹¹长春理工大学电信学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 针对利用主动光进行透窗探测所产生的反光问题,若仅依赖单偏振抑制反光,目标与背景之间对比度低,难以适用于强反射干扰下的目标透窗成像。而利用双偏振正交抑制反光,虽然对比度有所提高,但图像整体亮度较低,识别暗弱目标具有挑战性。本文以玻璃的镜面反光作为干扰对象,首先分析偏振抑制反光的能力,其次分析不同光源入射角下 Mueller 矩阵元素的变化规律,最后采用退偏图像来提高目标的显著性。结果表明, Mueller 矩阵中 M_{22} 和 M_{33} 图像在灰度值的分布中明显不同于其他矩阵元素,通过 M_{22} 和 M_{33} 生成的退偏图像可有效区分目标与背景。该方法在保证图像整体亮度较高的同时,有效地提高了目标与背景之间的对比度,从而可应用于强反射干扰下的目标透窗成像以及暗弱目标的识别。

关键词 偏振抑制反光; 透窗成像; Mueller 矩阵; 退偏图像

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230572

1 引言

在现实生活中,很多场合都需要对窗后目标进行探测,例如发生自然灾害时需要对被困车辆或被困船只内的目标进行识别;博物馆内需要滤除玻璃展示柜杂光,突出展品的真实样貌;在道路视频监控中需要准确识别驾驶者的驾驶状态;在打击犯罪时,需要精确区分窗后犯罪分子与人质之间的位置关系。诸如上述场合均需要比较合理的目标透窗探测方法,传统目标透窗探测方法主要分为三种,分别为主动透窗成像方法、基于分离反射的透窗成像方法和基于正交偏振信息的透窗成像方法^[1-2]。其中主动透窗成像方法在增加透射光的同时增加了反射光,容易在玻璃上形成光斑,进而影响目标探测。基于分离反射的透窗成像方法对透窗探测的角度要求过高,且在进行图像分离时会导致部分图像信息损失,在实际应用中可操作性不强。基于正交偏振信息的透窗成像方法不需要主动光源,隐蔽性较强,但受环境光影响较大,容易出现白色斑纹图像导致后期处理困难。因此上述目标透窗探测方法均具有一定的局限性,避免图像退化以及提高目标透窗探测方法的实用性是目前所面临的挑战。

偏振光可以在复杂环境下进行有效的信息传递^[3-5],国外研究者多采用偏振图像处理的方法来解决散射光干扰的图像^[6-8]。Zhao 等^[9]将传输矩阵方法与 Mueller 矩阵极化分解相结合,针对反射率差异较小但

偏振特性差异较大的目标以及大颗粒尺寸散射的情况,可以有效提高分辨率和清晰度,但该方法未考虑在主动照明成像实验中镜面反射产生的光斑,光斑也是干扰目标探测的重要因素,不应该被忽略。陈卫等^[10-11]设计了基于双线偏振片的可见光偏振检测系统,利用双线偏振片有效抑制耀光干扰,提高了目标的对比度。又通过将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,使目标细节轮廓信息更加清晰。叶松等^[12]通过不同偏振方向视频帧图像生成偏振辐射图序列进行耀光的抑制和剔除。张景华等^[13]通过恢复后的垂直方向光强图像来实现水面饱和耀光的抑制,从而提高目标的显著性。上述方法通过增加偏振片数量以及图像处理来解决图像退化问题,但对于目标与背景反射偏振特性差异并未进行深入研究,当光斑遮盖目标时上述方法并不适用。采用 Mueller 矩阵来表征散射介质的偏振信息更为全面,由于每种散射介质对应的 Mueller 矩阵有着独特的表达形式,若可以得到入射光场矩阵和出射光场矩阵,通过矩阵变换处理就可得到散射矩阵,进一步通过数据分析就可以得到不同散射介质的散射规律,故其被广泛应用于模块化 Mueller 矩阵显微镜制作^[14]、生物结构分析^[15-17]、临床医学成像^[18]等相关场合。本文在 Mueller 矩阵的实验中考虑到由反射产生的光斑,利用 Mueller 矩阵元素可以反映散射介质的退偏特性,通过目标与背景不同的反射偏振特性来达到抑制反光突出目标的目的。

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-21; 录用日期: 2023-05-16; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (62127813)

通信作者: *duanji@vip.sina.com

在目标透窗探测中,采用主动照明可以增加透射光光强,增加目标为主的有益反射光光强,并且可以通过加入起偏片来改变入射光的偏振态,便于采集 Mueller 矩阵图像计算时所需的偏振图像。本文在目标透窗探测实验中采用主动照明,但在实验中利用主动照明容易在玻璃上产生光斑。因此,本文首先分析了偏振抑制反光的能力,对比了 Mueller 矩阵中不同矩阵元素之间的差异,最后利用退偏图像来实现目标透窗探测。本文方法在抑制玻璃反射光的前提下保留了目标反射光,提高了目标的显著性,该方法普适性较高,可应用在强反射干扰下的目标识别,也适用于暗弱目标的识别,为不可避免地隔着玻璃进行的目标观测提供了有效的解决方案,也为后续的图像处理工作提供了更为优质的图像信息。

2 偏振抑制反光理论基础

2.1 透窗成像模型

自然光发出的入射光光矢量的分布各项均匀振幅相同,并不是完全的偏振光。入射光经过玻璃表面形成反射光和透射光,其中透射光经过目标反射后形成目标反射光,之后目标反射光又从玻璃表面出射被相机接收。为模拟目标透窗探测场景,将入射光、玻璃反射光、目标反射光、透射光和环境光转化为光学特性函数,从而得到透窗成像模型^[2],目标透窗成像模型如图 1 所示。

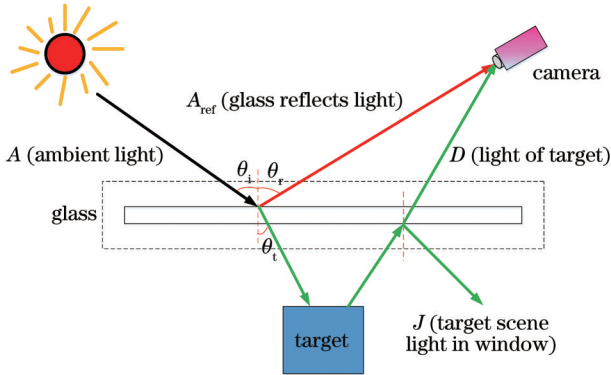


图 1 目标透窗成像模型

Fig. 1 Target through-window imaging model

到达相机的总光强如下式所示:

$$I(x, y) = D(x, y) + A_{\text{ref}}(x, y), \quad (1)$$

式中: $D(x, y)$ 指的是被相机接收到的目标反射光; $A_{\text{ref}}(x, y)$ 指的是入射光经过玻璃后玻璃反射的光。

$$t(x, y) = \frac{D(x, y)}{J(x, y)}, \quad (2)$$

式中: $J(x, y)$ 指的是无散射衰减的目标反射光; $t(x, y)$ 指的是传输系数,是出射光与入射光的比值。

$$D(x, y) = J(x, y)t(x, y), \quad (3)$$

$$A_{\text{ref}}(x, y) = A(x, y)r(x, y), \quad (4)$$

$$1 - t(x, y) = r(x, y), \quad (5)$$

式中: $A(x, y)$ 指的是环境光强; $r(x, y)$ 指的是反射系数。将式(3)~(5)代入到式(1)中可得

$$I(x, y) = J(x, y)t(x, y) + A(x, y)[1 - t(x, y)]. \quad (6)$$

通过对式(6)进行变形,就可以得到无玻璃反光的图像,即

$$J(x, y) = \frac{I(x, y) - A(x, y)[1 - t(x, y)]}{t(x, y)}. \quad (7)$$

因此,只要得到环境光强 $A(x, y)$ 和传输系数 $t(x, y)$ 就可以计算出 $J(x, y)$,但现实中通常无法预先得到 $A(x, y)$ 和 $t(x, y)$,所以难以通过透窗成像模型直接恢复无反光的图像。文献[2]在主动式多偏振角度激光透窗成像系统中,首先通过提取正交偏振分量来估计最佳入射角,其次分离目标反射光 $D(x, y)$ 和玻璃反射光 $A_{\text{ref}}(x, y)$,最后对目标图像进行图像增强。但估计入射角的取值可能会出现偏差,并且在进行图像增强时图像细节部分容易丢失。基于上述问题,本文针对目标反射光 $D(x, y)$ 和玻璃反射光 $A_{\text{ref}}(x, y)$ 的偏振特性差异作进一步深入研究,利用目标与玻璃反射偏振特性差异结合光传输过程中偏振态的变化来抑制玻璃反射光 $A_{\text{ref}}(x, y)$ 。

2.2 玻璃-空气起偏特性分析

由于玻璃表面打磨得非常光滑,可近似为镜面反射,经玻璃反射后的反射光具有强偏振特性,并且透射光透过玻璃照射在目标上形成的目标反射光同样具有偏振特性。通过 Fresnel 反射方程和 Snell 方程可知偏振光可分为 S 偏振光和 P 偏振光,其中 S 代表垂直入射面方向, P 代表平行入射面方向,进一步计算得到 S 和 P 两种不同偏振分量的反射率和透射率,计算公式分别为

$$\begin{cases} R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \\ R_p = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_s = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \cdot \frac{4 \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \\ T_p = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \cdot \frac{4 \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t) \cos^2(\theta_i - \theta_t)} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: R_s 和 R_p 分别为反射光中 S 偏振光和 P 偏振光的反射率; T_s 和 T_p 分别为透射光中 S 偏振光和 P 偏振光的透射率; n_1 为空气的折射率; n_2 为玻璃的折射率; θ_i 为入射光与法线的夹角; θ_t 为透射光与法线的夹角。

市面上玻璃制品的折射率略微不同,本文选用 K9 玻璃作为仿真对象,仿真时将玻璃的折射率设定为 1.5,空气折射率设定为 1,并且假定入射光在玻璃内

部不进行二次反射和折射,仿真过程采用每隔 10° 的入射角进行一次采样点计算,绘制出入射角和反射率与透射率的变化规律仿真图像,如图 2 所示。

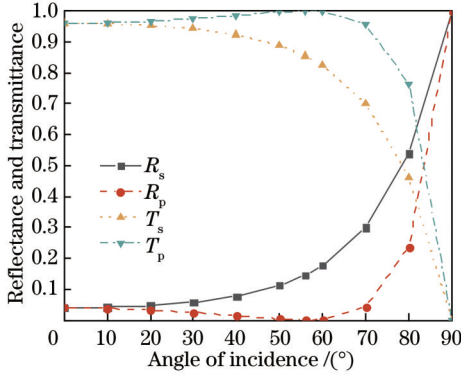


图 2 反射率与透射率变化规律仿真图^[2]

Fig. 2 Simulation image of reflectance and transmittance variation law^[2]

由图 2 可知,0°~56° 区间时 S 偏振光的反射率随着入射角的增加呈上升趋势,P 偏振光的反射率随着入射角的增加呈下降趋势。在入射角为 56° 时,P 偏振光反射率为 0,此时反射光为完全偏振光,此时入射角的角度称为布儒斯特角,利用平行偏振片可滤除 S 偏振光,此时抑制玻璃反光效果最好^[19-21]。但在实际操作中保证光以布儒斯特角入射的操作难度过大。当入射角大于 56° 时,S 偏振光和 P 偏振光的反射率都呈上升趋势,但 S 偏振光的反射率始终要大于 P 偏振光的反射率,证明平行偏振片仍可在一定程度上抑制反光^[22-23]。

进一步计算反射光和透射光的偏振度,反射光和透射光的偏振度计算公式为

$$\begin{cases} P_r = \frac{I_{rs} - I_{rp}}{I_{rs} + I_{rp}} = \frac{\cos^2(\theta_i - \theta_t) - \cos^2(\theta_i + \theta_t)}{\cos^2(\theta_i - \theta_t) + \cos^2(\theta_i + \theta_t)} \\ P_t = \frac{I_{ts} - I_{tp}}{I_{ts} + I_{tp}} = \frac{1 - \cos^2(\theta_i + \theta_t)}{1 + \cos^2(\theta_i + \theta_t)} \end{cases} \quad (10)$$

为可视化反射光与透射光偏振度的差异,本文绘制了不同入射角下反射与透射的偏振度关系的仿真图,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,透射光的偏振度大多数角度下都低于反射光的偏振度,并且透射光经过目标反射后导致相应的出射光场失去了与初始入射光场在空间中的相对位置关系,使成像的偏振信息更

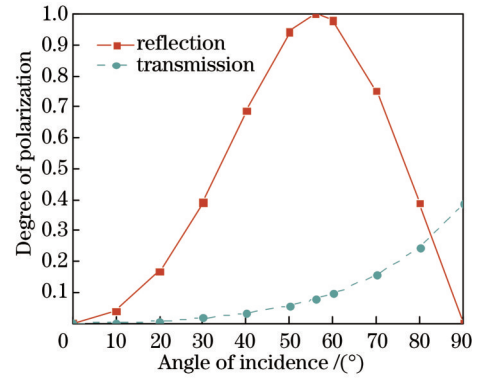


图 3 反射光与透射光偏振度变化规律仿真图

Fig. 3 Simulation image of reflected light and transmitted light polarization degree variation law

加复杂。在探测器前放入检偏片,镜面反射光和目标反射光中与检偏片起偏角正交方向的偏振信息被滤除,而与检偏片起偏角平行方向的偏振信息最终可通过检偏片被探测器接收。但在非布儒斯特角下形成的强反射光,单偏振片抑制镜面反光的能力十分有限。

2.3 Mueller 矩阵偏振分解

Mueller 矩阵被用来解释光传输过程中偏振态的变化,偏振光的传输过程在 Mueller 矩阵中被定义为

$$S' = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = MS = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}S_0 + M_{12}S_1 + M_{13}S_2 + M_{14}S_3 \\ M_{21}S_0 + M_{22}S_1 + M_{23}S_2 + M_{24}S_3 \\ M_{31}S_0 + M_{32}S_1 + M_{33}S_2 + M_{34}S_3 \\ M_{41}S_0 + M_{42}S_1 + M_{43}S_2 + M_{44}S_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: S 表示入射偏振光的 Stokes 矢量矩阵; S' 表示出射偏振光的 Stokes 矢量矩阵; M 表示 Mueller 矩阵; M_{11} 表示传输介质的光强信息; M_{12}, M_{13}, M_{14} 表示传输介质的双向衰减特性; M_{21}, M_{31}, M_{41} 表示传输介质的起偏特性; M_{22}, M_{33}, M_{44} 分别表示传输介质的水平线性、45° 线性和圆偏振退偏系数; $M_{23}, M_{24}, M_{34}, M_{32}, M_{42}, M_{43}$ 表示传输介质的相位延迟特性。

Mueller 矩阵可以通过起偏和检偏 36 种组合关系计算得出^[24], Mueller 矩阵的表达式为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{11} + I_{12} + I_{21} + I_{22} & I_{11} + I_{12} - I_{21} - I_{22} & I_{31} + I_{32} - I_{43} - I_{44} & I_{61} + I_{62} - I_{51} - I_{52} \\ I_{11} + I_{21} - I_{12} - I_{22} & I_{11} + I_{22} - I_{12} - I_{21} & I_{31} + I_{42} - I_{32} - I_{41} & I_{61} + I_{52} - I_{62} - I_{51} \\ I_{13} + I_{23} - I_{14} - I_{24} & I_{13} + I_{24} - I_{14} - I_{23} & I_{33} + I_{44} - I_{34} - I_{43} & I_{63} + I_{54} - I_{64} - I_{53} \\ I_{55} + I_{65} - I_{16} - I_{26} & I_{15} + I_{26} - I_{25} - I_{16} & I_{35} + I_{46} - I_{45} - I_{36} & I_{56} + I_{65} - I_{66} - I_{55} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: I 表示不同起偏和检偏组合下探测器件测到的光强度; 0° 和 90° 的线偏振光用编号 1 和 2 表示; 45° 和 135° 的线偏振光用 3 和 4 表示; 左旋和右旋圆偏振光用编号 5 和 6 表示。

根据 Lu-Chipman 极化分解方法, 将 Mueller 矩阵看作是散射退偏矩阵 M_Δ 、相位延迟矩阵 M_R 和双向衰减矩阵 M_D 三种独立子矩阵的乘积^[25-26]。Mueller 矩阵归一化的表达式为

$$M = M_{11} \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = M_\Delta \cdot M_R \cdot M_D, \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11} + I_{12} + I_{21} + I_{22} & I_{11} + I_{12} - I_{21} - I_{22} & I_{31} + I_{32} - I_{43} - I_{44} \\ I_{11} + I_{21} - I_{12} - I_{22} & I_{11} + I_{22} - I_{12} - I_{21} & I_{31} + I_{42} - I_{32} - I_{41} \\ I_{13} + I_{23} - I_{14} - I_{24} & I_{13} + I_{24} - I_{14} - I_{23} & I_{33} + I_{44} - I_{34} - I_{43} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Mueller 矩阵偏振分解成的子矩阵代表着独立的偏振特性, 有助于更好地理解传输介质本身的光学和微观变化。将散射退偏矩阵 M_Δ 、相位延迟矩阵 M_R 和双向衰减矩阵 M_D 的表达式代入式 (13) 得

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0^T \\ P_\Delta & m_\Delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0^T \\ 0 & m_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & D^T \\ D & m_D \end{pmatrix}. \quad (16)$$

线性偏振退偏矩阵 Δ_L 和圆偏振退偏矩阵 Δ_C 分别为

$$\begin{cases} \Delta_L = 1 - \frac{|m_{\Delta 22} + m_{\Delta 33}|}{2} \\ \Delta_C = 1 - |m_{\Delta 44}| \end{cases}. \quad (17)$$

通过式 (17) 计算得到的退偏图像可理解为利用数值量化去极化程度的大小, 退偏数值越大代表去极化程度越大, 退偏数值越小代表去极化程度越小。

3 Mueller 矩阵图像测试实验

本文自行设计建立了一套 Mueller 矩阵测试装置, 该装置主要由 K9 玻璃展示柜、偏振成像装置、偏振主动照明装置和图像处理系统四部分组成, Mueller 测试实验流程示意图如图 4 所示。偏振成像装置和偏振主动照明装置成方位角 180° 镜面几何位置放置, 将目标放置于玻璃展示柜中用于模拟需要透窗探测的目标, 本文目标选择为网球和草, 入射光通过这两种目标产生的目标反射光以漫反射光为主。利用偏振主动照明装置发出的入射光将目标照亮, 通过旋转起偏片 P1 调整成固定偏振态的入射光, 本文起偏片角度分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° , 对应图 4 中的字母 H、P、V、M, 再利用偏振成像装置采集目标的偏振图像。本文选用的相机为大恒光电的 MER2-502-79U3M POL 分焦平面相机 (DoFP)^[28-29], 其传感器为索尼 IMX-250-MZR, 分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$, 传感器像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ (H) \times $3.45 \mu\text{m}$ (V)。本文选用的分焦平面相机在车

$$m_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_{11}}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4. \quad (14)$$

由于自然光和大部分人工照明光都属于无偏振光, 自然光经过大气散射和室内平滑表面反射会产生线偏振光, 但一般不会产生圆偏振光, 所以自由空间成像一般只需要考虑线偏振成分。并且文献[27]的研究表明, 在实际操作中通过线性偏振测量同样可以量化传输介质的退偏振参数, 并且相较于全偏振测量方式更加便捷有效, 故本文采用线性偏振测量来进行 Mueller 矩阵成像, 线性偏振测量的 Mueller 矩阵表达式为

窗检测^[30]、海洋生态环境监测^[31-32]、应力测量^[33]等相关应用场景都被广泛使用。相机内置检偏片 P2 角度分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° , 可与起偏片角度一一对应, 采集图像更加便捷高效。DoFP 传感器具有“牺牲空间换取时间”的特性, 其成像方式为四个相邻像素以四个不同偏振角度成像。它的成像方式容易导致两个问题: 1) 瞬时视场误差; 2) 图像分辨率降低了一半。在进行分焦平面图像空间分辨率重建时可能会出现伪偏振现象, 伪偏振会引起图像边缘位置出现“锯齿现象”。针对上述问题, 本文通过双线性插值方法对偏振角度分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的图像进行插值, 以恢复分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$, 减少瞬时视场误差的影响。双线性插值相当于低通滤波器, 可以使获得的图像边缘更加平滑柔和, 降低由于伪偏振所引起的“锯齿现象”^[29]。Mueller 矩阵测试实验装置图如图 5 所示。

从 Fresnel 反射定律中可知, 当光从光疏介质入射到光密介质表面发生反射时, S 偏振分量和 P 偏振分量相位会发生改变^[34], 反射光相移的规律由表 1 可知, 其中 θ 为入射光的入射角度, θ_B 为布儒斯特角, 由公式 $\theta_B = \arctan(n_2/n_1)$ 求得, 其中 n_1 为光疏介质的折射率, n_2 为光密介质的折射率。这里的光疏介质为空气, 光密介质为玻璃。

光源入射角小于 θ_B 时, S 偏振分量相位变化为 π , 即 45° 线偏振光转变为 -45° 线偏振光。本文主要采用了 4 个等间距的光源入射角度来进行目标透窗探测, 光源入射角度分别为 20° 、 30° 、 40° 和 50° , 并且这 4 个角度也是常规进行目标透窗探测的角度, 所以不存在探测角度的特殊性, 不会由此对本文方法的有效性产生怀疑。

在实际进行目标透窗探测或不可避免地隔着玻璃进行目标观测中, 可能会出现以下问题: 1) 改变观测角

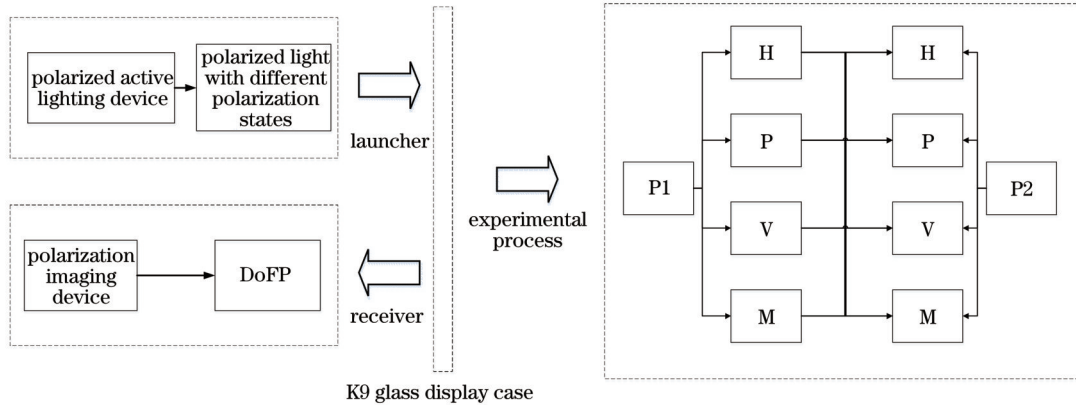


图 4 Mueller矩阵测试实验流程示意图
Fig. 4 Flow diagram of Mueller matrix test experiment

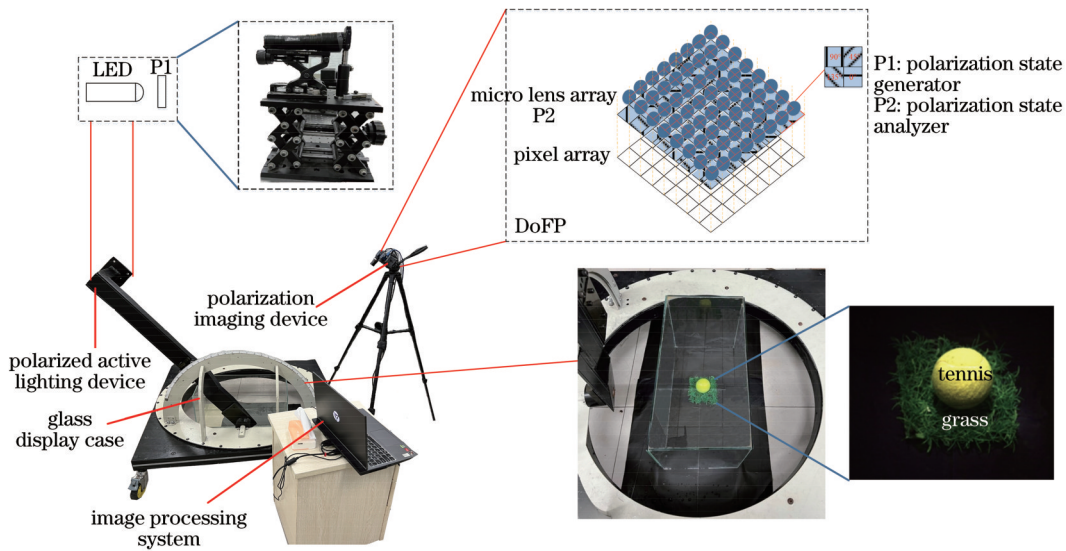


图 5 Mueller矩阵测试实验装置
Fig. 5 Mueller matrix test experimental setup

表 1 S 和 P 偏振分量反射光相移变化规律

Table 1 Phase shift law of S and P polarization component reflected lights

Polarization component	$0^\circ < \theta < \theta_B$	$\theta = \theta_B$	$\theta_B < \theta < 90^\circ$	$\theta = 0^\circ$ or $\theta = 90^\circ$
P	0	uncertainty	π	Half-wave loss
S	π	π	π	Half-wave loss

度来避免反光可能会造成部分目标图像无法采集;2) 改变照明强度来避免反光,当照明光强度较小时可能会造成只有少部分光透射到玻璃窗内,目标为主的有益反射光信号较弱,导致最后探测器接收到的光信号以玻璃窗反射光干扰信号为主,而非目标为主的有益反射光信号;3)增加观测距离可能会对实验产生影响,当通过增加观测距离来避免反光,可能会造成目标在图像中显示得过小,无法探测到目标的细节特征信息。基于上述问题,在保证目标完整性不缺失的前提下固定观测角度,并在不同光源入射角形成的反光下实现对目标的探测是本文的研究目的。

4 偏振抑制反光实验结果

4.1 偏振抑制玻璃反光能力分析

通过 2.2 节可知,镜面反射光拥有强偏振特性,可通过偏振抑制反光的方法来进行目标透窗探测,本文基于此展开了实验。首先调整光源强度模拟强反射干扰下目标透窗成像,由于将相机的曝光程度调低会无法模拟真实人眼视觉效果,故测试实验将相机曝光程度调整成与人眼视觉相近。利用单偏振抑制反光方法采集到的图像如图 6 所示。

由图 6 可知,由于强反射光干扰,采集到的图像过曝光,目标与背景难以区分。利用单偏振抑制反光方法

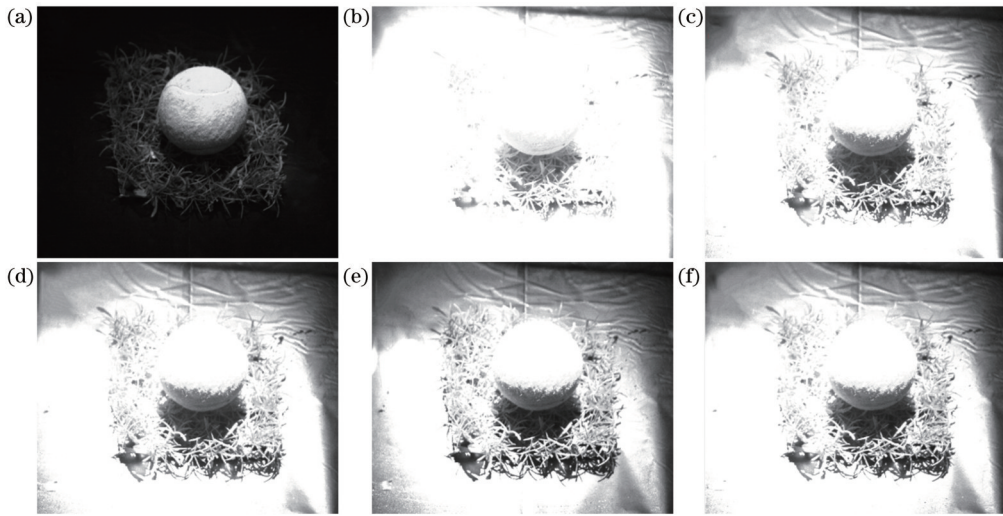


图 6 单偏振抑制反光。(a)目标原图像;(b)过曝光图像;(c) $P_2 = 0^\circ$;(d) $P_2 = 45^\circ$;(e) $P_2 = 90^\circ$;(f) $P_2 = 135^\circ$

Fig. 6 Single polarization suppression of reflection. (a) Target source image; (b) overexposed image; (c) $P_2 = 0^\circ$; (d) $P_2 = 45^\circ$; (e) $P_2 = 90^\circ$; (f) $P_2 = 135^\circ$

得到的图像亮度有所降低,但目标细节信息仍不易辨识。故本文利用起偏方向与检偏方向正交的双偏振正交方法进行目标透窗探测,采集的图像如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,利用起偏方向与检偏方向正交的双偏振正交方法很好地抑制了镜面反光,目标与

背景的对亮度有所提高,但图像整体亮度较低,在实际应用中对于暗弱目标的识别能力较差。为了量化分析偏振抑制玻璃反光的能力,计算了单偏振抑制方法和双偏振正交方法下的图像整体亮度和目标与背景之间的对比度,图像指标如图 8 所示。

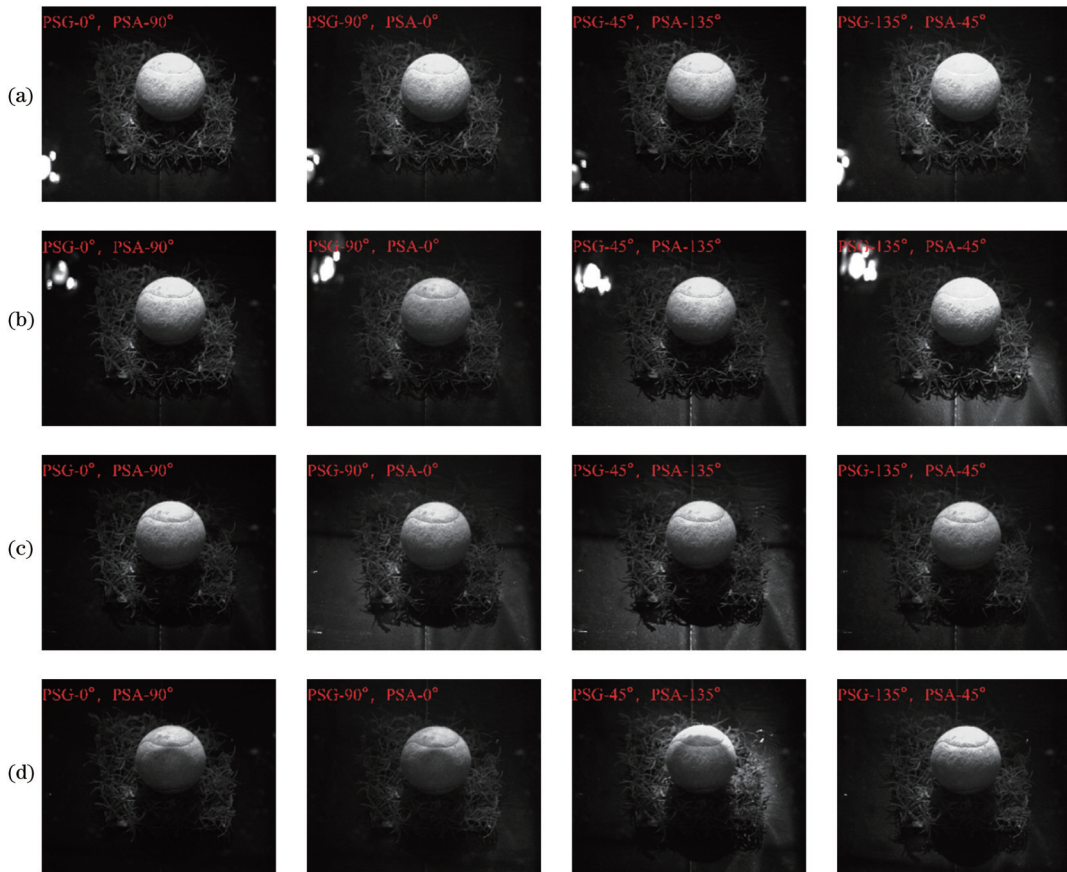


图 7 不同光源入射角下双偏振正交抑制反光。(a) 20° ;(b) 30° ;(c) 40° ;(d) 50°

Fig. 7 Double polarization orthogonal suppression of reflection under different incident angles of light source. (a) 20° ; (b) 30° ; (c) 40° ; (d) 50°

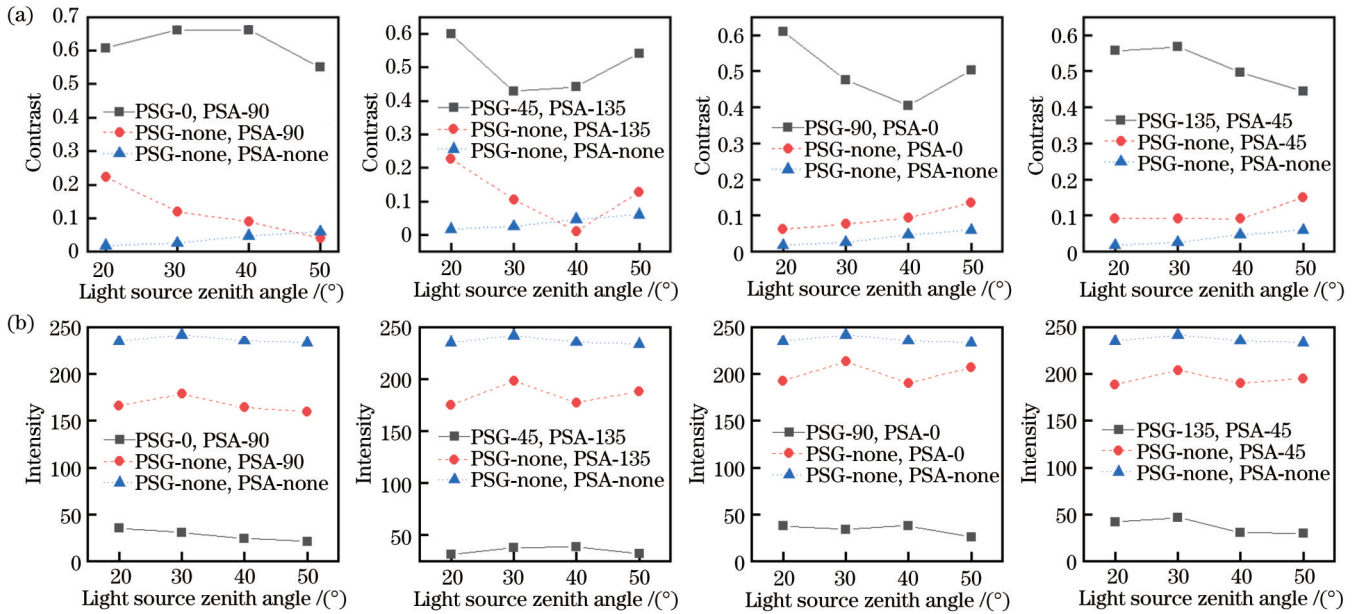


图 8 图像指标对比结果。(a)目标与背景之间的对比度;(b)图像整体光强度

Fig. 8 Image index comparison results. (a) Contrast between target and background; (b) overall image light intensity

从图 8 中可以看出,双偏振正交方法利用镜面反射光与目标反射光的偏振特性差异,采用检偏片抑制正交偏振信息,通过与检偏片相同偏振方向的偏振信息,进而达到抑制反光的目的。但双偏振正交方法获得的图像整体亮度值过低,识别暗弱目标困难,双偏振正交方法虽然有效但实际应用能力仍有缺陷,故本文进一步利用 Mueller 矩阵图像生成退偏图像,从而得到

目标透窗效果更好的图像。

4.2 Mueller 矩阵图像分析和退偏图像生成

本文将 Mueller 矩阵测试装置采集到的图像通过式 (15) 计算得到 Mueller 矩阵图像,图 9 显示了 20°、30°、40°和 50°这 4 个光源入射角度下的原始 Mueller 矩阵图像。

从图 9 中可以看出, Mueller 矩阵的对角线元素

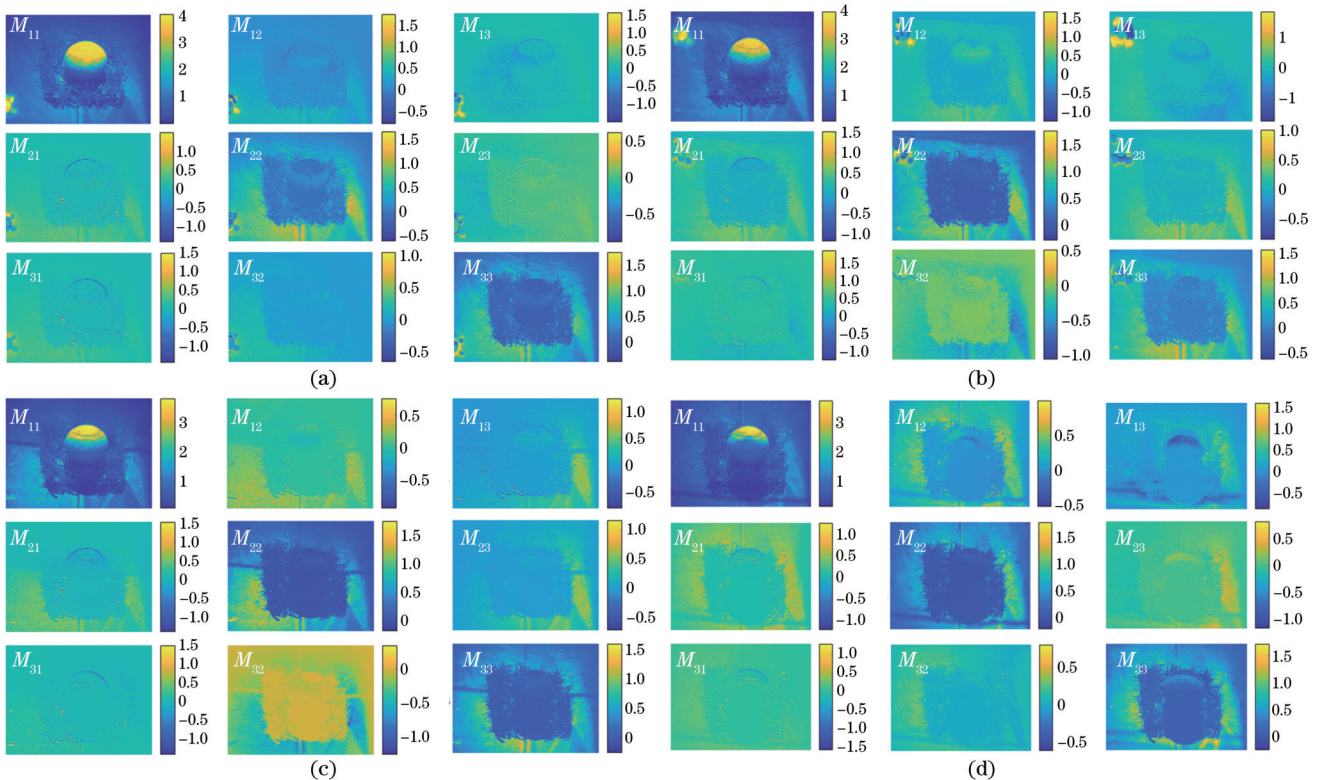


图 9 不同光源入射角下的 Mueller 矩阵图像。(a) 20°;(b) 30°;(c) 40°;(d) 50°

Fig. 9 Mueller matrix images under different incident angles of light source. (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°; (d) 50°

M_{22} 和 M_{33} 图像与其他矩阵元素图像之间存在显著差异, 目标与背景之间的对比度相对较高, 这种视觉差可以更好地分辨目标。为了进一步比较不同 Mueller 矩

阵元素的差别, 分析其内在规律及其特有的偏振属性, 本文将原始 Mueller 矩阵图像转换为灰度图, 并采用灰度直方图来描述灰度值的分布, 如图 10 所示。

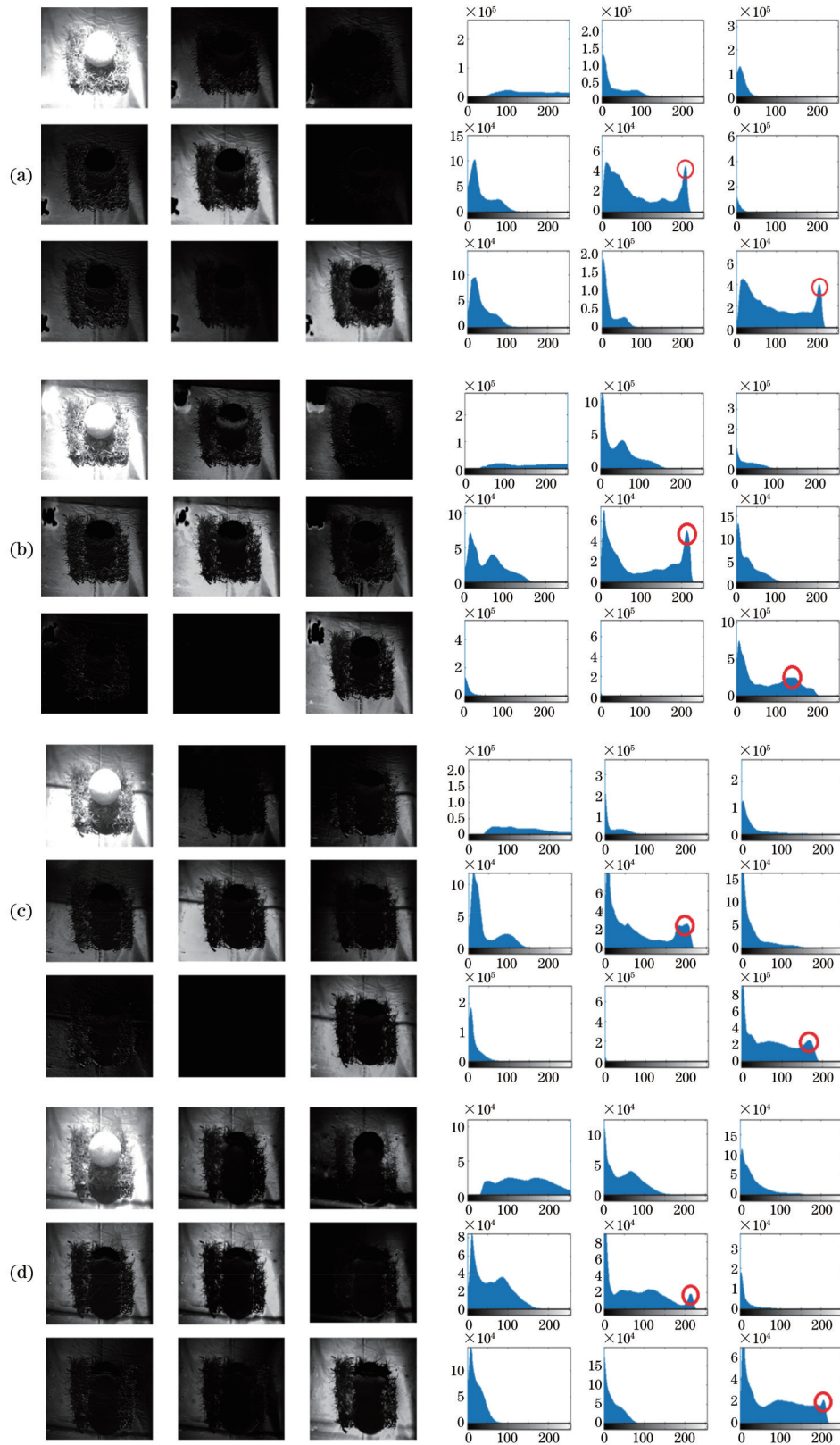


图 10 不同光源入射角下灰度 Mueller 矩阵图像及其直方图。(a) 20°; (b) 30°; (c) 40°; (d) 50°

Fig. 10 Gray Mueller matrix images and their histograms under different incident angles of light source. (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°; (d) 50°

图 10 左侧对应 Mueller 矩阵图像, 右侧对应其灰度直方图, 图中圆圈对应位置为灰度直方图灰度值的峰值。从图 10 中可以看出, M_{22} 和 M_{33} 图像对于目标和背景之间的区分最为敏感, 并且 M_{22} 和 M_{33} 图像相比于其他矩阵元素图像灰度值更为分散。圆圈处标注的灰度峰值均来自于 M_{22} 和 M_{33} 图像, 在 M_{22} 和 M_{33} 图像中高灰度值对应着背景, 而目标维持比较低的灰度值, 目标与背景之间的对比度较高, 目标的细节辨识度更好, 这也为后续的目标透窗探测提供了良好的先提条件。不同目标的灰度值分布在 M_{22} 和 M_{33} 图像中也有着不同的规律, 本文计算了不同材料下的 Mueller 矩阵元素灰度平均值, 计算结果如表 2 所示。

表 2 不同材料下的 Mueller 矩阵元素

Table 2 Mueller matrix elements of different materials

Material	M_{11}	M_{22}	M_{33}
Tennis	0.936	0.022	0.009
Grass	0.736	0.079	0.069
Background	0.968	0.781	0.587

由表 2 可知, 由于不同材料的偏振特性差异较大, 利用 M_{22} 和 M_{33} 图像的灰度值可以分辨不同目标材料, 为不同目标物的识别提供了更丰富的信息。进一步对比在不同光源入射角下 Mueller 矩阵不同元素图像的差异, 如图 11 所示。

Mueller 矩阵中 M_{11} 代表不考虑偏振态的总光强度。从图 11 中不同 Mueller 矩阵元素图像灰度值对比中可以看出, 不同光源入射角下 M_{11} 图像灰度值均高

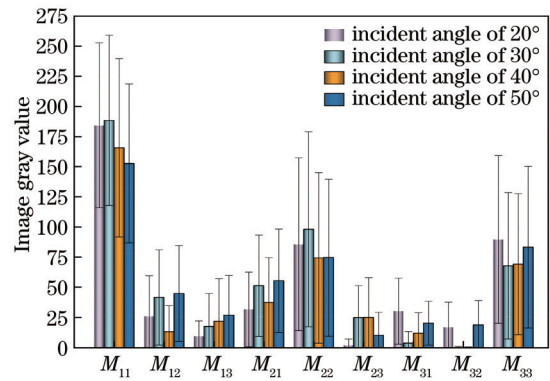


图 11 不同光源入射角下 Mueller 矩阵不同元素图像的差异
Fig. 11 Differences in images of different elements of Mueller matrix under different incident angles of light source

于 150, M_{22} 和 M_{33} 图像灰度值在 65~100 之间, 其他矩阵元素图像灰度值均低于 55。在不同 Mueller 矩阵元素图像标准差的对比中可以看出, 不同光源入射角下 M_{22} 和 M_{33} 图像对比 M_{11} 图像以及其他矩阵元素图像拥有更高的标准差。综上所述, M_{22} 和 M_{33} 图像亮度和灰度值离散程度高于除 M_{11} 图像以外的其他矩阵元素图像, 可以更为容易地观察目标与背景之间的亮暗变化。统计结果表明, 在进行 Mueller 矩阵图像测试实验过程中, M_{22} 和 M_{33} 图像对比其他矩阵元素图像存在显著差异, 并且不同光源入射角度下规律相似, 可以推断出利用 M_{22} 和 M_{33} 图像作为基础图像是进行目标透窗探测的关键。进一步通过对 M_{22} 和 M_{33} 图像进行计算得到 Mueller 矩阵偏振分解的退偏图像, 如图 12 所示。退

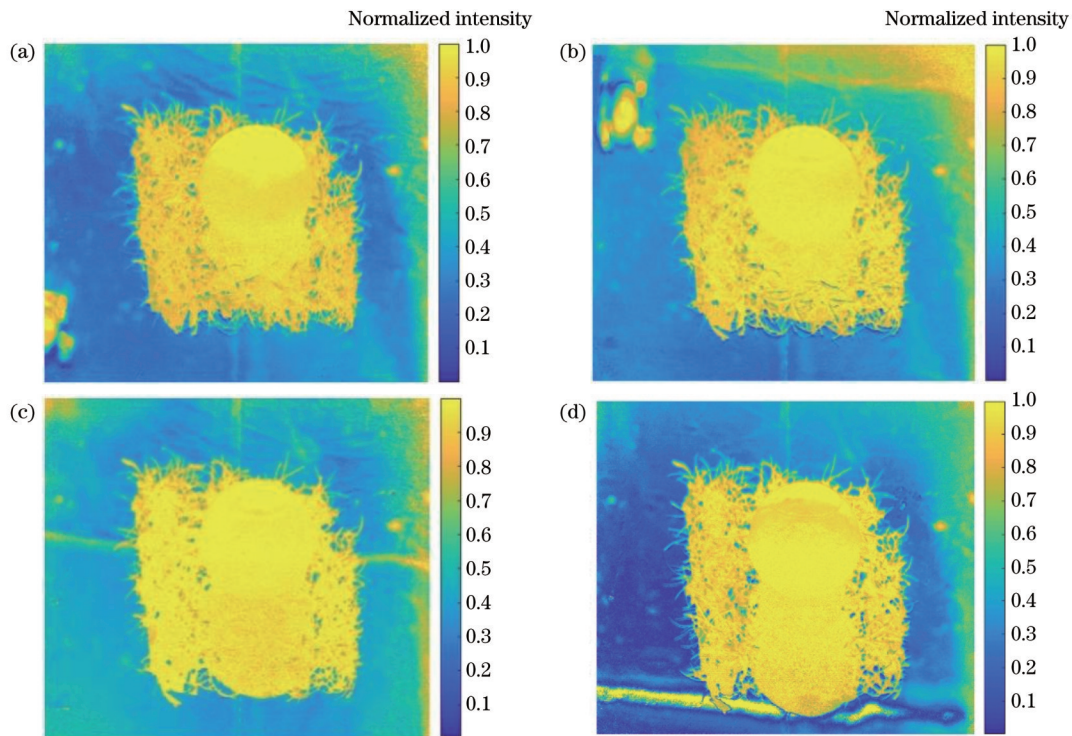


图 12 不同光源入射角下的退偏图像。(a)20°;(b)30°;(c)40°;(d)50°

Fig. 12 Depolarization images under different incident angles of light source. (a) 20°; (b) 30°; (c) 40°; (d) 50°

偏图像目标与背景指标对比如表 3 所示。

表 3 退偏图像目标与背景指标对比
Table 3 Comparison of target and background indices in depolarization images

Incident angle	Tennis		Grass		Background Intensity
	Intensity	Contrast	Intensity	Contrast	
20°	0.952	0.574	0.875	0.544	0.256
30°	0.972	0.523	0.907	0.499	0.303
40°	0.977	0.364	0.954	0.354	0.455
50°	0.966	0.491	0.894	0.458	0.331

从图 12 和表 3 中可以看出,网球和草的退偏强度值明显高于表面反射产生背景的退偏强度值,对比背景的退偏强度值平均提高了 47.6%,并且在与表面反射产生背景的对比中网球和草都拥有较高的对比度,可以比较容易地分辨目标与背景,在不同的光源入射角度下都呈现相似规律,这说明利用退偏图像来进行目标透窗探测的方法是可行的。退偏图像不同于其他偏振图像,它是由 M_{22} 和 M_{33} 作为基础图像求得的,通过观察式(12)可知, M_{22} 和 M_{33} 是由偏振方向平行的图像与正交图像相减而产生的,这也验证了图 10 中目标图像灰度值低于背景图像灰度值的结论。起偏方向与检偏方向平行的图像灰度值高于起偏方向与检偏方向正交的图像灰度值,在目标透窗探测中图像亮度值较高往往伴随着图像过曝光,所以利用退偏图像可以提高目标的显著性,便于在目标透窗探测中分辨目标。

为平行对比不同方法下获得的目标透窗探测图像,本文在相同实验装置条件下,固定光源入射角为 30°,分别采用单偏振抑制方法(Method 1)和双偏振正交方法(Method 2)进行目标透窗探测,实验结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,单偏振抑制方法获得的图像亮度最低值为 178.913,对比度最高为 0.147,双偏振

表 4 目标透窗探测图像指标对比

Polarization suppression reflection method	Specific implementation	Intensity	Contrast
Overexposed image	No P2	241.951	0.033
	P2 = 0°	213.201	0.086
	P2 = 45°	204.207	0.106
	P2 = 90°	178.913	0.147
	P2 = 135°	198.357	0.121
Method 1	P1 = 0°, P2 = 90°	30.222	0.653
	P1 = 45°, P2 = 135°	38.114	0.452
	P1 = 90°, P2 = 0°	33.861	0.445
	P1 = 135°, P2 = 45°	46.663	0.524
Method 2	—	154.709	0.481
Depolarization image	—	154.709	0.481

正交方法获得的图像亮度最低值为 30.222,对比度最高为 0.653,比单偏振抑制方法获得的图像亮度平均值降低了 58.3%,对比度提高了 50.6%,背景的信息被较好地滤除,目标的细节信息得以保留,但图像整体亮度较低,暗弱目标的识别具有挑战性。退偏图像的图像亮度为 154.709,对比度为 0.481,在保证图像整体亮度较高的同时,提高了目标与背景之间的对比度,在应对大多数角度下的目标透窗探测均有较好的图像效果,并且不会因为光源强度过大造成图像信息损失,相对单偏振抑制方法和双偏振正交方法有了明显的改善。本文方法的普及对现实生活中相关应用场合的产品设计具有重要指导意义。

5 结 论

现实生活中进行目标透窗探测时,单偏振抑制反光方法在强反射光干扰下适应能力较差,双偏振正交方法虽然可以在强反射光干扰下进行目标识别,但图像整体亮度较低,难以适用于暗弱目标的识别。本文设计了 Mueller 矩阵测试装置,首先分析了偏振抑制反光的能力,其次分析了不同光源入射角下 Mueller 矩阵元素灰度值分布,得到不同 Mueller 矩阵元素变化规律,最后采用退偏图像来提高目标的显著性。结果证明, M_{22} 和 M_{33} 生成的退偏图像可有效区分目标与背景,在保证图像整体亮度较高的同时,有效提高了目标与背景之间的对比度,因此合理利用退偏图像进行目标透窗探测可以有效地抑制反光,提高目标细节信息的辨识度,为相关应用场合的产品设计以及不可避免的目标透窗探测需求提供了全新的解决方案。但本文没有进一步利用图像融合的方法对退偏图像进行优化处理,导致图像的某些部分出现了亮斑,未来将对退偏图像作进一步优化处理,利用图像融合的方法将图像恢复成无亮斑图像。

参 考 文 献

- [1] 王振武,高隼,范之国,等.利用正交偏振信息的透玻璃成像方法[J].量子电子学报,2019,36(6):691-698.
Wang Z W, Gao J, Fan Z G, et al. Method of imaging penetrating glass and film using orthogonal polarization information[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2019, 36(6): 691-698.
- [2] 蒋涛.强反射干扰下动态目标高速透窗成像技术研究[D].北京:北京科技大学,2021.
Jiang T. Research on penetrating the glass and film image detection technology with the high-speed dynamic target in strongly reflection interference[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [3] 张肃,战俊彤,付强,等.非均匀烟雾环境对偏振光传输特性的影响[J].光学学报,2018,38(7):353-359.
Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of inhomogeneous smog environment on transmission characteristics of polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 353-359.
- [4] 战俊彤,张肃,付强,等.不同湿度环境下可见光波段激光偏振特性研究[J].红外与激光工程,2020,49(9):209-215.
Zhan J T, Zhang S, Fu Q, et al. Laser polarization

- characteristics of visible light band in different humidity environments[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 209-215.
- [5] Zhang S, Zhan J T, Fu Q A, et al. Propagation of linear and circular polarization in a settling smoke environment: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(17): 4687-4694.
- [6] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, et al. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(5): 997-1005.
- [7] Guan J G, Cheng Y Y, Chang G L. Time-domain polarization difference imaging of objects in turbid water[J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 82-87.
- [8] Liu F, Han P L, Wei Y, et al. Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4903-4906.
- [9] Zhao Y Z, Li Y H, He W J, et al. Polarization scattering imaging experiment based on Mueller matrix[J]. *Optics Communications*, 2021, 490: 126892.
- [10] 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): 69-74.
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): 69-74.
- [11] 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.
- [12] 叶松, 屈文学, 李树, 等. 基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1001003.
Ye S, Qu W X, Li S, et al. Sea surface glint-suppression method based on the polarization time-domain characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001003.
- [13] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于偏振特征的水面饱和耀光抑制技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(24): 2401009.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Suppression technology for saturated water surface glint based on polarization characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2401009.
- [14] 黄彤宇, 孟若愚, 赵千皓, 等. 模块化全偏振显微镜[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1517002.
Huang T Y, Meng R Y, Zhao Q H, et al. Modular full-polarization microscope[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1517002.
- [15] Sheng W, Li W P, Qi J, et al. Quantitative analysis of 4×4 Mueller matrix transformation parameters for biomedical imaging[J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 34.
- [16] Zhu Y H, Dong Y, Yao Y, et al. Probing layered structures by multi-color backscattering polarimetry and machine learning[J]. *Biomedical Optics Express*, 2021, 12(7): 4324-4339.
- [17] Chen B G, Li W P, He H H, et al. Analysis and calibration of linear birefringence orientation parameters derived from Mueller matrix for multi-layered tissues[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146: 106690.
- [18] 沈元星, 姚悦, 何宏辉, 等. 非标记、定量化的穆勒矩阵偏振成像在辅助临床诊断中的应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207001.
Shen Y X, Yao Y, He H H, et al. Mueller matrix polarimetry: a label-free, quantitative optical method for clinical diagnosis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207001.
- [19] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1526001.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1526001.
- [20] 邓宇, 付强, 张肃, 等. 基于偏振检测技术的水面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 2001003.
Deng Y, Fu Q, Zhang S, et al. Method of suppressing sea surface solar flare based on polarization detection technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 2001003.
- [21] 杨梅梅, 赵佩瑶, 冯斌, 等. 偏振滤光结合多项式拟合的水面太阳耀光抑制方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2401002.
Yang M M, Zhao P Y, Feng B, et al. Water surface Sun glint suppression method based on polarization filtering and polynomial fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2401002.
- [22] 李岩松, 赵慧洁, 李娜, 等. 基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910004.
Li Y S, Zhao H J, Li N, et al. Target detection based on mid-infrared polarization under the background of sea surface solar glint[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910004.
- [23] 朱鹤骞, 曲宏松. 海面背景耀光的自适应抑制系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201006.
Zhu H Q, Qu H S. Adaptive suppression system of sea surface background glare[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1201006.
- [24] Du E, He H H, Zeng N, et al. Two-dimensional backscattering Mueller matrix of sphere-cylinder birefringence media[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(12): 126016.
- [25] Lu S Y, Chipman R A. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(5): 1106-1113.
- [26] 宋俊宏, 肖作江, 李英超, 等. 油雾粒子浓度变化对散射穆勒矩阵的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2301001.
Song J H, Xiao Z J, Li Y C, et al. Influence of concentration variation of oil mist particles on scattering Mueller matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2301001.
- [27] Swami M K, Manhas S, Buddhivant P, et al. Polar decomposition of 3×3 Mueller matrix: a tool for quantitative tissue polarimetry[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9324-9337.
- [28] 罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20210987.
Luo H B, Zhang J C, Gai X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210987.
- [29] 赵峰, 程喜萌, 冯斌, 等. 分焦平面偏振图像插值算法的比较研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(16): 161014.
Zhao F, Cheng X M, Feng B, et al. Comparison research of interpolation algorithms for division of focal plane polarization image[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(16): 161014.
- [30] Mo S X, Duan J, Zhang W X, et al. Multi-angle orthogonal differential polarization characteristics and application in polarization image fusion[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(32): 9737-9748.
- [31] 张伟, 战俊彤, 张肃, 等. 粗糙水面环境溢油目标多角度可见光偏振特性[J]. *光学学报*, 2023, 43(6): 0601010.
Zhang W, Zhan J T, Zhang S, et al. Polarization characteristics of multi-angle visible light of oil spill target in rough water environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0601010.
- [32] 史浩东, 王稼禹, 李英超, 等. 复杂海况下海洋生态环境多维度光学监测方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600004.
Shi H D, Wang J Y, Li Y C, et al. Multi-dimensional optical monitoring method of marine ecological environment under complex sea conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600004.
- [33] 高阳, 万新军, 解树平. 偏振相机的透明元件应力测量[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 284-290.
Gao Y, Wan X J, Xie S P. Stress measurement of transparent elements based on polarized camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 284-290.
- [34] 张华伟. 偏振光蒙特卡罗大气传输模型及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Zhang H W. The Monte Carlo study of polarized light propagation in atmosphere: simulation and application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

Polarization Suppression Reflection Method Based on Mueller Matrix

Wang Jialin¹, Duan Jin^{1*}, Fu Qiang², Xie Guofang¹, Mo Suxin¹, Fang Ruisen¹

¹College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²National Defense Key Laboratory of Air-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective In real life, the targets behind the window need to be detected on many occasions. For example, when a natural disaster occurs, the targets inside trapped vehicles and boats should be identified, and it is also necessary for museums to filter out glass display cases of stray light and highlight the true appearance of exhibits. Additionally, the driving status of drivers should be accurately identified in road video surveillance, and in the fight against crimes, it is a necessity to accurately distinguish the location relationship between criminals and hostages behind the window. These occasions require a more reasonable target through-window detection method, and traditional target through-window detection methods have certain limitations in avoiding image degradation. The current research mostly adopts polarization image processing and image fusion methods to solve the image degradation, but these methods are not applicable in the light spot obscuring the target. When reflection interferes with target identification, single polarization suppression reflection is the most commonly employed polarization suppression reflection method. However, in the face of strong reflected light interference, the acquired image is overexposed and it is difficult to distinguish the target from the background. Utilizing double polarization suppression reflection can overcome the strong reflected light interference, and the contrast between the target and the background is improved with lower overall image brightness, and the recognition ability for dark and weak targets is poor in practical applications. Therefore, a more reasonable polarization suppression reflection method is necessary for active imaging, and it can be applied to target recognition under strong reflection interference and to the recognition of dark and weak targets. Finally, better image information for subsequent image processing can be provided.

Methods The specular reflection of glass is used as the interference object. Firstly, we analyze the ability of polarization suppression reflection and conduct polarization suppression reflection experiments by single polarization suppression method and double polarization orthogonal method respectively. Secondly, we analyze the change law of Mueller matrix elements under different incident angles of light source. M_{22} and M_{33} images in the Mueller matrix are different from other matrix elements in the distribution of gray values, and the depolarized images generated by M_{22} and M_{33} can effectively distinguish the target from the background. Finally, by comparing the target through-window detection image index, it is proven that the utilization of depolarized images can ensure higher overall brightness of the images and improve contrast between the target and the background simultaneously.

Results and Discussions The double polarization orthogonal method suppresses the specular reflection well, with improved contrast between the target and the background and lower overall image brightness (Fig. 8). The M_{22} and M_{33} images are the most sensitive to the distinction between the target and the background, and the gray values of the M_{22} and M_{33} images are more dispersive than those of other matrix elements (Fig. 10). The mean gray value and standard deviation of M_{22} and M_{33} images are significantly higher than those of other matrix elements, which indicates that the brightness dispersion and gray values of M_{22} and M_{33} images are much higher than those of other matrix elements, and the incident angles of different light sources show the same pattern (Fig. 11). The depolarized images improve the contrast between the target and the background, and ensure the overall image brightness. Meanwhile, they have a sound image effect in dealing with the target through-window detection at most angles, and do not cause image information loss due to the excessive intensity of the light source (Table 4).

Conclusions This study designs a Mueller matrix test setup. Firstly, the polarization ability to suppress reflection is analyzed. Secondly, the gray value distribution of Mueller matrix elements under different incident angles of the light source is analyzed to obtain the change law of different Mueller matrix elements. Finally, depolarized images are employed to improve the target saliency. The results show that the double polarization orthogonal method exploits the difference in polarization characteristics between the specularly reflected light and the target reflected light. The orthogonal polarization information is suppressed by the polarizer. The polarization information through the same polarization direction as the polarizer is applied to achieve the purpose of suppressing reflection. However, the overall image brightness obtained by the

double polarization orthogonal method is too low, and it is difficult to identify the dark and weak targets. The double polarization orthogonal method is effective but defective in practical application capability.

In analyzing the variation pattern of Mueller matrix elements under different incident angles of the light source, the average gray values and standard deviation of M_{22} and M_{33} images in the Mueller matrix are significantly higher than those of other matrix elements. This indicates that the dispersion of brightness and gray values of M_{22} and M_{33} images are much higher than those of other matrix elements, and the incident angles of different light sources show the same pattern. The depolarized images generated by M_{22} and M_{33} can effectively distinguish the target from the background. Therefore, we further adopt Mueller matrix images to generate depolarized images and obtain images with better target through-window detection. The depolarized images generated by M_{22} and M_{33} improve the contrast between the target and the background and ensure the overall image brightness. They have a better image effect in dealing with target through-window detection at most angles and do not cause image information loss due to excessive light source intensity. There is a significant improvement over the single polarization suppression method and the double polarization orthogonal method. Therefore, the reasonable use of depolarized images for target through-window detection can effectively suppress reflection and improve the recognition of target detail information. Additionally, a new solution is provided for the relevant applications of product design and the unavoidable requirement for target through-window detection. However, we do not further optimize the depolarized images through image fusion, resulting in bright spots in some parts of the images. In the future, image optimization will be conducted on depolarized images, and image fusion will be employed to restore the images to bright spot-free ones.

Key words polarization suppression reflection; through-window imaging; Mueller matrix; depolarization image