

基于偏振差分补偿的暗通道先验水下去散射*

霍永胜¹⁾²⁾ 朱陈一菲^{3)†}

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (西安交通大学前沿科学技术研究院, 西安 710049)

(2026 年 4 月 12 日收到; 2026 年 5 月 25 日收到修改稿)

传统暗通道先验方法虽能在一定程度上提升散射退化图像的可见性,但在非理想散射条件下,复原结果中往往仍残留一定背景散射成分,从而限制了目标与背景的分离.针对这一问题,本文在暗通道先验框架下引入偏振差分补偿,以进一步削弱复原结果中的残余背景散射.基于 McCartney 散射模型,对暗通道先验复原过程进行了理论分析,推导了非理想条件下的残余背景散射表达式,并将偏振信息纳入目标项与背景项的响应建模.为验证所提方法的有效性,构建浑浊介质环境开展主动激光偏振照明实验,并选取典型目标-背景组合进行成像测试.实验结果表明,该方法不仅能够有效抑制散射噪声,而且能够联合利用强度信息与偏振信息提高目标与背景的可分辨性;当目标与背景具有不同去偏振响应特征时,可进一步增强二者对比度并改善成像质量.该方法为浑浊介质中的光学目标探测与识别提供了一种具有物理约束基础的实现思路.

关键词: 暗通道先验, 偏振, 散射抑制, 浑浊介质成像**DOI:** 10.7498/aps.75.20260512**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260512

1 引言

浑浊介质中的光学成像过程通常伴随散射与吸收效应,其中背向散射会在探测器端形成与目标信号叠加的背景分量,显著降低图像对比度并掩盖弱目标细节^[1-3].随着散射粒子浓度升高或传播路径增长,目标直达光持续衰减,而背景散射占比上升,导致目标边缘模糊、灰度层次压缩,甚至目标与背景难以区分的情况^[4,5].该问题广泛存在于水下目标探测、海洋观测以及浑浊介质中的主动光学成像等应用场景中,并直接影响后续目标检测、识别和参数反演的可靠性^[6].

现有去散射研究主要包括基于强度信息的图像复原方法和基于偏振信息的散射分离方法.其中暗通道先验及其水下扩展由于实现简洁且能够显

著改善图像可见性,已成为单幅图像去散射研究中的代表性技术路线之一^[7-10].围绕特征先验、多先验融合、物理模型自适应优化、细节增强以及联合偏振信息的复原策略等方向,相关改进方法持续出现^[11-17].然而,此类方法本质上仍依赖于背景光和透射率的近似估计,复原性能对先验成立条件和参数估计精度较为敏感.当介质散射条件偏离理想模型或背景光与透射率估计存在偏差时,反演结果中往往仍会保留未被充分消除的背景散射成分.

与基于强度信息的复原方法相比,偏振去散射方法利用目标直达光与背景散射光在偏振度、偏振方向及 Stokes 参数上的差异实现成分分离,为浑浊介质成像提供了具有物理约束特征的处理途径^[18-20].Schechner 等^[21]建立了基于偏振的雾霾视觉模型,证明偏振信息可用于分离目标辐射与背景空气光;随后又将这一思路推广到水下场景,

* 国家自然科学基金(批准号: 62005251)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zbdx_zcyf@163.com

建立了基于偏振估计背景光和目标辐射的经典框架[22,23]. 近年来, 偏振去散射研究又在高浊度主动偏振成像、自然光水下清晰化、Stokes 矢量利用以及动态场景复原等方面持续推进[24-28].

相较于主要依赖灰度或颜色统计特征的暗通道先验方法, 偏振成像能够在强度信息之外提供目标辐射与背景散射的附加判别维度, 因而在目标与背景强度对比不足难以实现有效分离时具有重要优势. 对于经暗通道先验复原后的图像, 尽管整体可见性通常能够得到改善, 但结果中仍可能保留残余背景散射. 此类残余分量在强度域内往往难以进一步辨识, 而其偏振响应仍可能与目标项存在差异, 因此偏振信息为残余背景散射的进一步表征与抑制提供了新的物理依据.

基于上述分析, 本文从经典散射成像模型出发, 将暗通道先验复原与偏振补偿机制结合起来, 建立一种面向浑浊介质成像的背景散射抑制方法. 首先基于 McCartney 散射模型和暗通道先验复原公式, 推导暗通道先验非精确反演条件下的残余背景散射表达式, 明确其与透射率估计误差及背景光估计误差之间的关系. 其次在偏振矢量表示下建立目标项与残余背景项在两正交通道中的响应模型, 给出理想共模抑制条件, 并在非理想通道失配情况下引入差分补偿系数. 最后通过构建浑浊介质环境, 结合主动激光偏振照明实验验证所提方法在背景抑制、偏振结构保持和目标增强方面的有效性.

2 方法

2.1 暗通道先验复原及其残余背景散射分析

对于散射环境中的光学成像过程, 传感器接收

到的图像信号通常可由如图 1 所示的 McCartney 模型描述[29], 其表达式具体定义为

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)), \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 为观测图像, $J(x)$ 是待恢复的图像. A 为背景散射光, x 是像素的空间坐标. $t(x)$ 表示光线通过浑浊介质的透射率, 由比尔-朗伯定律确定[30]:

$$t(x) = e^{-\alpha(x)d(x)}, \quad (2)$$

其中, α 和 d 分别是浑浊介质中的衰减系数和传输距离.

暗通道先验去散射的基本思想是在局部窗口 $\Omega(x)$ 内假设透射率近似恒定, 其中 $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的邻域窗口, y 表示窗口内任意像素位置, 即:

$$t(y) \approx t(x), \quad y \in \Omega(x), \quad (3)$$

并利用清晰图像局部暗通道近零的经验先验得到暗通道图像:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in R, G, B} J^c(y)), \quad (4)$$

其中 $\min$ 表示在局部窗口和颜色通道上同时取最小值. 记录暗通道图像中最亮的前 0.1% 的像素点位置对应到 $I(x)$ 中, 将像素强度的最大值用于估计背景散射分量 $\tilde{A}^c$. 将 (1) 式两边除以 A , 并在窗口与颜色通道上取最小值, 可得 (5) 式:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \approx 1 - t(x), \quad (5)$$

进一步移项得到暗通道先验的透射率估计:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{\tilde{A}^c} \right), \quad (6)$$

其中 ω 为保留少量介质感的权重系数. 为避免小透射率导致数值不稳定, 通常引入透射率下界 $t_0 = 0.1$

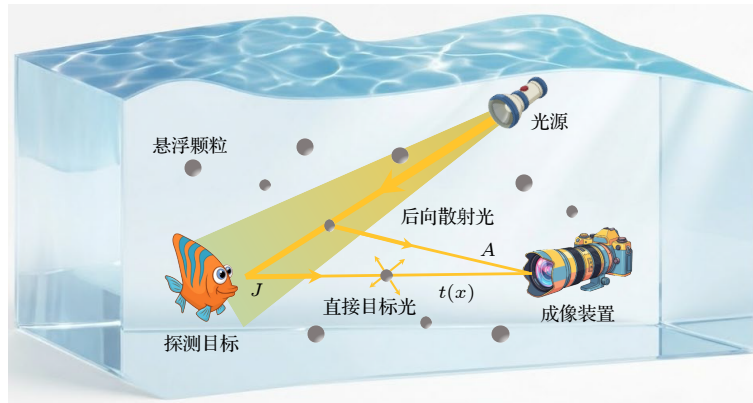


图 1 水下散射成像模型示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the underwater scattering imaging model.

进行修正. 由此可得暗通道先验的实际复原结果恢复公式:

$$\tilde{J}(x) = \frac{I(x) - \tilde{A}^c}{\max(\tilde{t}(x), t_0)} + \tilde{A}^c. \quad (7)$$

将 (1) 式代入 (7) 式, 可得

$$\begin{aligned} \tilde{J}(x) = & \frac{J(x)t(x)}{\max(\tilde{t}(x), t_0)} \\ & + \frac{A(\max(\tilde{t}(x), t_0) - t(x)) - (\tilde{A}^c - A)(1 - \max(\tilde{t}(x), t_0))}{\max(\tilde{t}(x), t_0)}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, (8) 式中的第 2 项反映了由透射率估计误差和背景光估计误差共同引起的残余背景散射. 定义残余背景散射项为

$$\begin{aligned} B(x) = & \frac{A(\max(\tilde{t}(x), t_0) - t(x)) - (\tilde{A}^c - A)(1 - \max(\tilde{t}(x), t_0))}{\max(\tilde{t}(x), t_0)}. \end{aligned} \quad (9)$$

则 (9) 式可改写为

$$\tilde{J}(x) = \frac{J(x)t(x)}{\max(\tilde{t}(x), t_0)} + B(x). \quad (10)$$

(10) 式表明, 暗通道先验复原并非理想精确反演. 当透射率和背景散射光只能近似估计时, 复原结果除目标项的幅值缩放误差外, 还会保留显式的残余背景散射项 $B(x)$.

2.2 基于 Stokes 表征的偏振响应建模

由 2.1 节可知, 暗通道先验复原结果仍由目标保留项和残余背景项共同构成. 令 $T(x) = \frac{J(x)t(x)}{\max(\tilde{t}(x), t_0)}$, 表示暗通道先验复原结果中的目标保留项, 则 (10) 式可进一步改写为

$$\tilde{J}(x) = T(x) + B(x). \quad (11)$$

为描述目标保留项与残余背景项在不同分析方向下的偏振响应, 采用 Stokes 向量中的强度分量和线偏振分量分别表征 $T(x)$ 与 $B(x)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_T &= [T(x), Q_T(x), U_T(x)]^T, \\ \mathbf{S}_B &= [B(x), Q_B(x), U_B(x)]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

对于分析方向为 θ 的线偏振分析器, 其输出强度可表示为

$$I(x, \theta) = \frac{1}{2}(S_0(x) + S_1(x) \cos(2\theta) + S_2(x) \sin(2\theta)). \quad (13)$$

取两相互正交的分析方向 θ_0 与 $\theta_0 + \frac{\pi}{2}$, 分别定义为平行通道和正交通道, 则暗通道先验复原结果在两通道中的表达式为

$$\tilde{J}_{//}(x) = T_{//}(x) + B_{//}(x), \quad \tilde{J}_{\perp}(x) = T_{\perp}(x) + B_{\perp}(x), \quad (14)$$

其中, $T_{//}(x)$ 和 $T_{\perp}(x)$ 分别表示目标保留项在平行通道和正交通道中的分量, $B_{//}(x)$ 和 $B_{\perp}(x)$ 表示残余背景项在两通道中的分量, 其具体表达式为

$$\begin{aligned} T_{//}(x) &= \frac{T(x) + Q_T(x) \cos(2\theta_0) + U_T(x) \sin(2\theta_0)}{2}, \\ T_{\perp}(x) &= \frac{T(x) - Q_T(x) \cos(2\theta_0) - U_T(x) \sin(2\theta_0)}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} B_{//}(x) &= \frac{B(x) + Q_B(x) \cos(2\theta_0) + U_B(x) \sin(2\theta_0)}{2}, \\ B_{\perp}(x) &= \frac{B(x) - Q_B(x) \cos(2\theta_0) - U_B(x) \sin(2\theta_0)}{2}. \end{aligned} \quad (16)$$

为将差分表达式写成更紧凑的形式, 根据偏振理论得到目标保留项与残余背景项的线偏振度及主偏振方向:

$$\begin{aligned} \rho_T(x) &= \frac{\sqrt{Q_T(x)^2 + U_T(x)^2}}{T(x)}, \\ \varphi_T(x) &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U_T(x)}{Q_T(x)} \right), \\ \rho_B(x) &= \frac{\sqrt{Q_B(x)^2 + U_B(x)^2}}{B(x)}, \\ \varphi_B(x) &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U_B(x)}{Q_B(x)} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

则两通道差分可写为

$$\begin{aligned} & \tilde{J}_{//}(x) - \tilde{J}_{\perp}(x) \\ &= \rho_T(x) T(x) \cos 2(\varphi_T(x) - \theta_0) \\ & \quad + \rho_B(x) B(x) \cos 2(\varphi_B(x) - \theta_0). \end{aligned} \quad (18)$$

定义有效偏振投影系数 $\beta_T(x)$ 和 $\beta_B(x)$, 分别表示目标保留项和残余背景项在当前分析方向下的有效偏振投影:

$$\begin{aligned} \beta_T(x) &= \rho_T(x) \cos 2(\varphi_T(x) - \theta_0), \\ \beta_B(x) &= \rho_B(x) \cos 2(\varphi_B(x) - \theta_0). \end{aligned} \quad (19)$$

则 (18) 式可简化为

$$\tilde{J}_{//}(x) - \tilde{J}_{\perp}(x) = \beta_T(x) T(x) + \beta_B(x) B(x). \quad (20)$$

(20) 式表明偏振差分结果一般同时包含目标

保留项和残余背景项. 差分运算并不会自动消除背景, 其抑制效果取决于残余背景在当前观测基下的有效偏振投影 $\beta_B(x)$ 是否足够小. 只有当该投影接近于零, 或残余背景在两通道中近似退化为共模时, 差分结果才主要由目标响应决定.

2.3 背景共模抑制与差分补偿机制

由 2.2 节推导可知, 当分析方向满足 $\varphi_B(x) - \theta_0 = \pm \frac{\pi}{4}$ 时, 则有 $\cos 2(\varphi_B(x) - \theta_0) = 0$, 此时残余背景项在两正交通道中退化为共模:

$$B_{//}(x) = B_{\perp}(x) = \frac{B(x)}{2}, \quad (21)$$

得到差分结果退化为

$$\tilde{J}_{//}(x) - \tilde{J}_{\perp}(x) = \beta_T(x)T(x), \quad (22)$$

进一步代入 $\theta_0 = \varphi_B(x) \mp \frac{\pi}{4}$, 可得

$$\tilde{J}_{//}(x) - \tilde{J}_{\perp}(x) = \pm \rho_T(x)T(x) \sin 2(\varphi_T(x) - \varphi_B(x)). \quad (23)$$

(23) 式对应理想的背景共模抑制情形. 在这一条件下, 残余背景项在差分域中可近似被抵消, 而目标项则保留与其偏振响应相关的有效分量.

结合 2.1 节的分析可知, 暗通道先验复原后仍会保留残余背景项; 而多重散射、目标去偏振以及暗通道先验估计误差又会进一步导致两通道中的残余背景不再严格共模. 因此, 在真实浑浊介质成像中, 普通偏振差分往往难以完全抑制背景, 仍需引入补偿机制. 定义一般形式的差分补偿为

$$I_R(x) = \tilde{J}_{\perp}(x) - \eta \tilde{J}_{//}(x). \quad (24)$$

将 (14) 式代入 (24) 式, 可得

$$I_R(x) = (T_{\perp}(x) - \eta T_{//}(x)) + (B_{\perp}(x) - \eta B_{//}(x)). \quad (25)$$

若要求残余背景项在补偿后尽可能抵消, 则应满足:

$$B_{\perp}(x) - \eta B_{//}(x) = 0. \quad (26)$$

从而得到差分补偿系数

$$\eta = \frac{B_{\perp}(x)}{B_{//}(x)}. \quad (27)$$

由于残余背景本质上仍为非负强度量, 可进一步将其写成总强度与有效偏振投影的组合形式:

$$\begin{aligned} B_{//}(x) &= \frac{B(x)(1 + \beta_B(x))}{2}, \\ B_{\perp}(x) &= \frac{B(x)(1 - \beta_B(x))}{2}. \end{aligned} \quad (28)$$

结合 (27) 式和 (28) 式, 并考虑补偿系数主要表征两正交通道残余背景的失配强度而非方向信息, 可将理想补偿关系写为

$$\eta = \frac{1 - |\beta_B(x)|}{1 + |\beta_B(x)|}. \quad (29)$$

需要指出的是, $\beta_B(x)$ 表征的是残余背景在当前分析基下的有符号偏振投影, 其符号反映偏振方向相对分析基的朝向, 而其绝对值反映两正交通道残余背景的失配程度. 由 $0 \leq |\beta_B(x)| \leq 1$ 可知, 补偿系数理论边界满足 $0 \leq \eta \leq 1$. 当 η 接近 1 时, 说明两通道残余背景的幅值更接近, 等效共模特征更强; 当 η 减小时, 则表明残余背景失配增强, 需要更强的补偿作用.

3 实验装置

图 2 给出了浑浊介质后向散射条件下的偏振差分暗通道成像实验装置. 实验采用波长为 650 nm 的激光器作为照明光源. 为减弱激光高相干性带来的散斑干扰, 在光路中加入扩散器以降低照明的空间相干性. 随后利用由两片偏振片构成的可变光衰减器调节入射光强, 从而在保证场景获得足够照明的同时避免相机饱和. 经扩束后入射光束直径约为 14 mm, 全角发散角为 0.05 mrad, 可近似视为准直平行光. 照明偏振态由偏振态发生器控制, 本文实验仅考虑线偏振照明情形. 探测端在偏振态分析器与 CMOS 相机之前放置可调光阑, 用于抑制环境杂散光等非目标信号. 浑浊介质环境由稀释 Intralipid 溶液配制, 并置于尺寸为 20 cm × 20 cm × 20 cm 的亚克力容器中. 实验中选用表面较平整的铝制“NUC”字样作为目标, 选用表面粗糙的光盘作为背景, 并将前者贴附于后者表面,

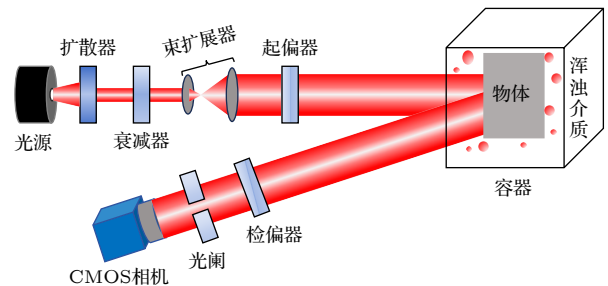


图 2 偏振暗通道成像实验装置示意图

Fig. 2. Experimental setup of the polarimetric dark-channel imaging system.

以构造典型的目标-背景组合场景. 其距离容器前壁为 10 cm. 为定量表征浑浊介质对成像通道的散射作用, 本文采用等效光学深度 OD 描述实验中的散射退化程度, 其定义为 $OD = \mu_s L$, 其中 μ_s 为介质等效散射系数, L 为有效传播距离. OD 越大, 表示光在介质传播过程中受到的散射作用越强. 探测端采用 8 bit CMOS 相机记录图像. 考虑到光电器件响应波动及随机噪声会影响测量稳定性, 每个偏振通道均对同一场景连续采集 4 帧图像并取平均.

4 实验结果与分析

图 3 展示了空气环境下铝片与光盘的偏振反射及退偏振测量结果. 退偏振是指入射偏振光与物体相互作用后, 其偏振有序性被削弱并部分转化为非偏振分量的过程. 由于铝片与光盘的反射率较为接近, 仅依靠强度信息难以有效区分; 而在偏振照明条件下, 二者随偏振态分析器轴线旋转表现出明显不同的响应特征. 铝片的返回信号主要集中在同偏振通道, 交叉偏振通道强度显著降低, 说明其反射过程具有较强保偏特征. 相比之下, 光盘在不同偏振通道中的响应更均匀, 表明其表面结构引起的多次反射与散射增强了偏振混合, 使出射光表现出更明显的退偏振效应. 从物理机制上看, 目标项与背景项的偏振差异主要来源于二者散射过程的不同. 浑浊介质中的背景散射主要由介质颗粒引起的体散射和多次散射组成, 传播路径中的随机散射会逐渐破坏入射线偏振态的有序性, 使背景散射在两个正交偏振通道中更容易表现为退偏振或近似共模响应. 相比之下, 目标返回光不仅受到介质传播

影响, 还与目标表面的反射方式有关. 对于表面较平整的目标, 其反射过程中仍可保留较明显的偏振选择性. 因此, 当目标与背景在强度域中差异不明显时, 二者在偏振响应上的差异仍可为目标-背景分离提供额外判据.

图 4 展示了暗通道先验去散射方法处理前后所获得的图像质量对比, 光深 $OD = 3.112$. 如图 4(a1) 所示, 在利用强度信息进行原始成像时, 浑浊介质引起的散射光以背景噪声的形式叠加到目标信号上, 从而显著降低图像清晰度. 通过暗通道先验处理可以获得更高质量的成像结果, 图 4(b1) 中目标轮廓与局部亮结构更加清晰. 考虑到探测获得的有效信号主要集中在共偏振检测通道中, 进一步借助偏振态分析仪分别获取了与原始同偏振和交叉偏振检测通道对应的偏振图像, 如图 4(a2), (a3) 所示, 并在此基础上对两通道分别实施暗通道先验处理, 得到图 4(b2), (b3). 可以看出, 暗通道先验不仅提高了偏振图像的整体可见性, 也使目标边界和局部结构更加明确. 图 4(c) 给出了沿图 4(a1) 中红色水平虚线提取的横向强度剖面. 与原始图像相比, 暗通道先验处理后的背景基线明显降低, 目标区域局部峰值和边缘跃迁更加突出, 说明该方法能够抑制背景散射并增强目标局部对比度.

为验证暗通道先验预处理在提升图像可见性的同时, 是否能够保留场景中原有的偏振判别信息, 选用偏振结构量 P_s 进行分析, 具体定义为

$$P_s = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}}, \quad (30)$$

该量表征两正交通道之间的归一化差异, 能够在削弱共同强度背景影响的同时突出与偏振相关的空

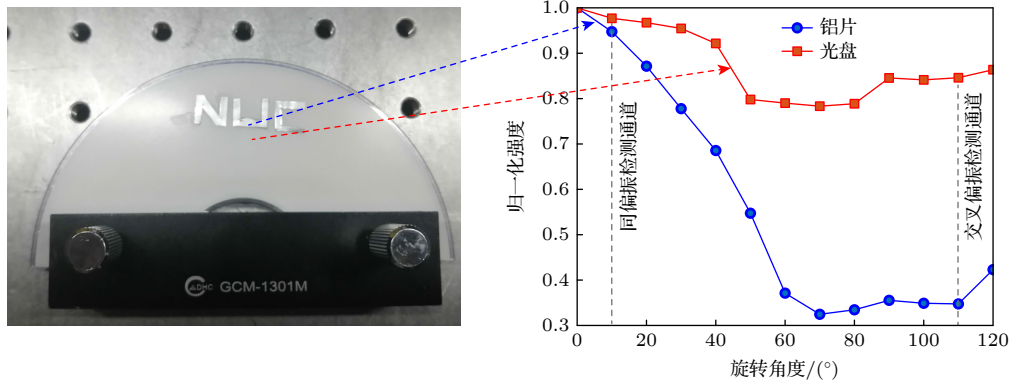


图 3 空气中铝片与光盘的角分辨偏振反射及退偏振响应对比

Fig. 3. Comparison of angle-resolved polarized reflection and depolarization responses of an aluminum sheet and an optical disk in air.

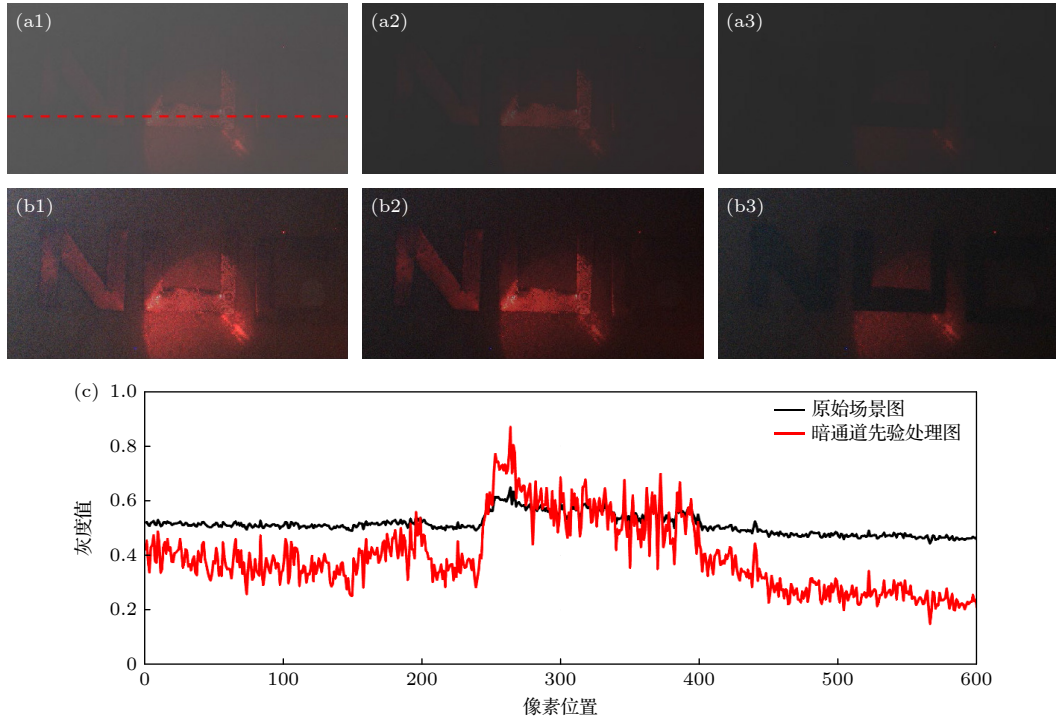


图 4 暗通道先验处理前后结果 (a1) 原始场景图; (a2) 同偏振通道分量; (a3) 交叉偏振通道分量; (b1) 暗通道先验去散射图; (b2) 处理后同偏振通道分量; (b3) 处理后交叉偏振通道分量; (c) 沿图 (a1) 红色虚线位置提取的横向强度剖面

Fig. 4. Comparison before and after DCP processing: (a1) Original scene; (a2) co-polarized components; (a3) cross-polarized components; (b1) DCP result; (b2) corresponding DCP-processed co-polarized components; (b3) corresponding DCP-processed cross-polarized components; (c) transverse intensity profile along the red dashed line in panel (a1).

间结构. 式中, $I_{//}$ 和 $I_{\perp}$ 分别表示偏振态分析器透振轴与入射线偏振方向平行和正交时, 由 CMOS 相机记录到的有效光强. 这里的平行和正交均相对于本文实验中设定的偏振分析方向定义, 并不表示对目标反射后完整散射光场进行全空间偏振分解. 实际探测过程中, 受目标表面反射、介质散射以及有限接收角的共同影响, 返回光场包含不同传播方向和偏振状态的成分, 而 CMOS 相机仅记录进入探测视场的部分光场. 因此, 该归一化偏振通道差异指标应理解为当前成像系统下的等效双通道偏振差异表征, 用于描述目标与背景在本文探测条件下的相对偏振响应.

图 5 针对偏振结构量进行分析, 图 5(a), (b) 分别给出了暗通道先验处理前后的偏振结构分布. 可以看出, 处理前后偏振结构的高响应区域均主要集中在目标主体及其边缘附近, 说明暗通道先验处理并未改变偏振结构的主要空间分布. 处理后目标区域的响应幅值提高、边界过渡更加清晰, 表明背景散射对偏振差异信息的掩盖得到削弱. 图 5(c) 给出了处理前后偏振结构量的像素级一致性散点关系, 相关系数为 0.888, 平均绝对误差为 0.090, 说明

暗通道先验处理前后的偏振结构在空间分布上具有较好一致性; 同时偏振结构响应的平均增益约为 2.66 倍, 表明处理主要增强了已有偏振差异信息. 图 5(d) 中的剖面对比进一步显示, 处理前后主要峰值位置基本一致, 而幅值和边缘过渡更加明显.

图 6 进一步比较了暗通道先验处理结果与偏振暗通道差分结果之间的差异. 由于实验采用 650 nm 照明, 在该条件下彩色图像红色检测通道具有最高的信噪比, 因此以下分析均基于红色检测通道展开. 由图 6(a) 可见, 暗通道先验处理后目标已能够从浑浊背景中辨识出来, 但目标下方仍存在较明显的残余背景响应, 目标与背景之间的强度分离仍然有限. 图 6(b) 表明经过偏振暗通道差分后, 背景基线进一步降低, 目标亮条区域的响应显著增强. 局部放大图中目标边界更加锐利、内部结构也更加清晰. 图 6(c) 给出的强度剖面验证了偏振暗通道差分后的曲线在目标所在区间形成了更陡的边缘过渡, 而背景区域整体下移, 表明该过程在增强目标响应的同时进一步抑制了残余背景. 图 6(d) 对图中绿色框选取的目标区域和蓝色框选取的邻近背景区域的平均强度进行了统计. 暗通道

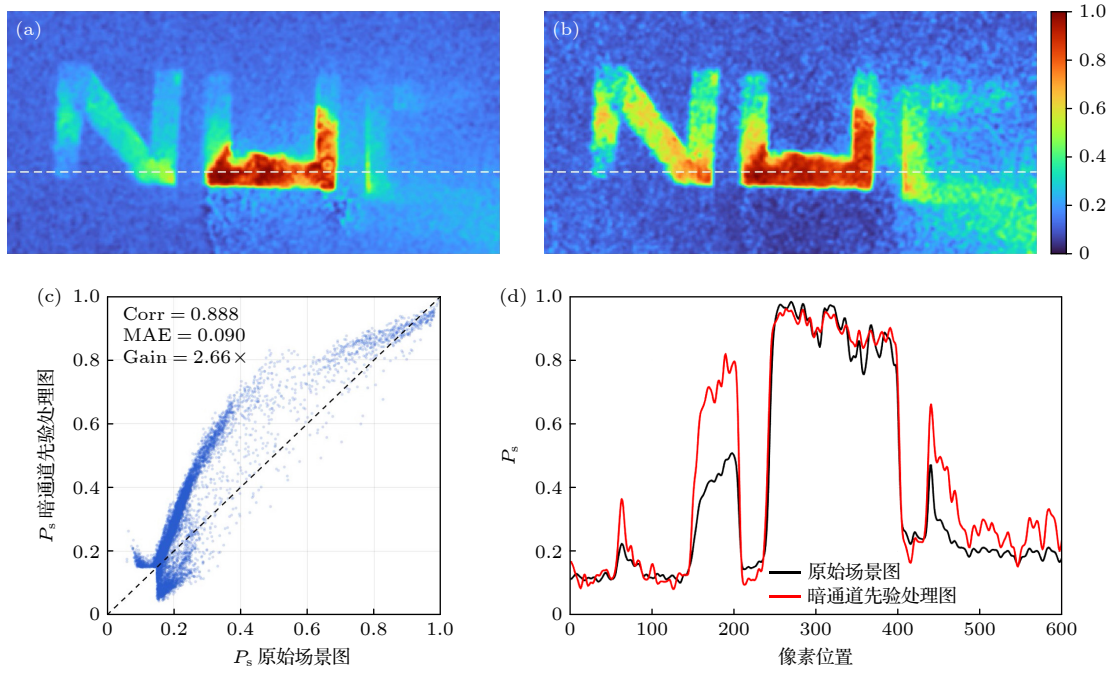


图 5 暗通道先验处理后偏振结构保持性的比较 (a) 原始偏振结构图; (b) 暗通道先验处理后偏振结构图; (c) 像素级一致性散点图; (d) 沿图 (a) 虚线位置提取的偏振结构剖面对比

Fig. 5. Polarization-structure preservation before and after DCP processing: (a) Original polarization structure; (b) DCP-processed polarization structure; (c) pixel-level consistency; (d) polarization-structure profiles along the dashed line in panel (a).

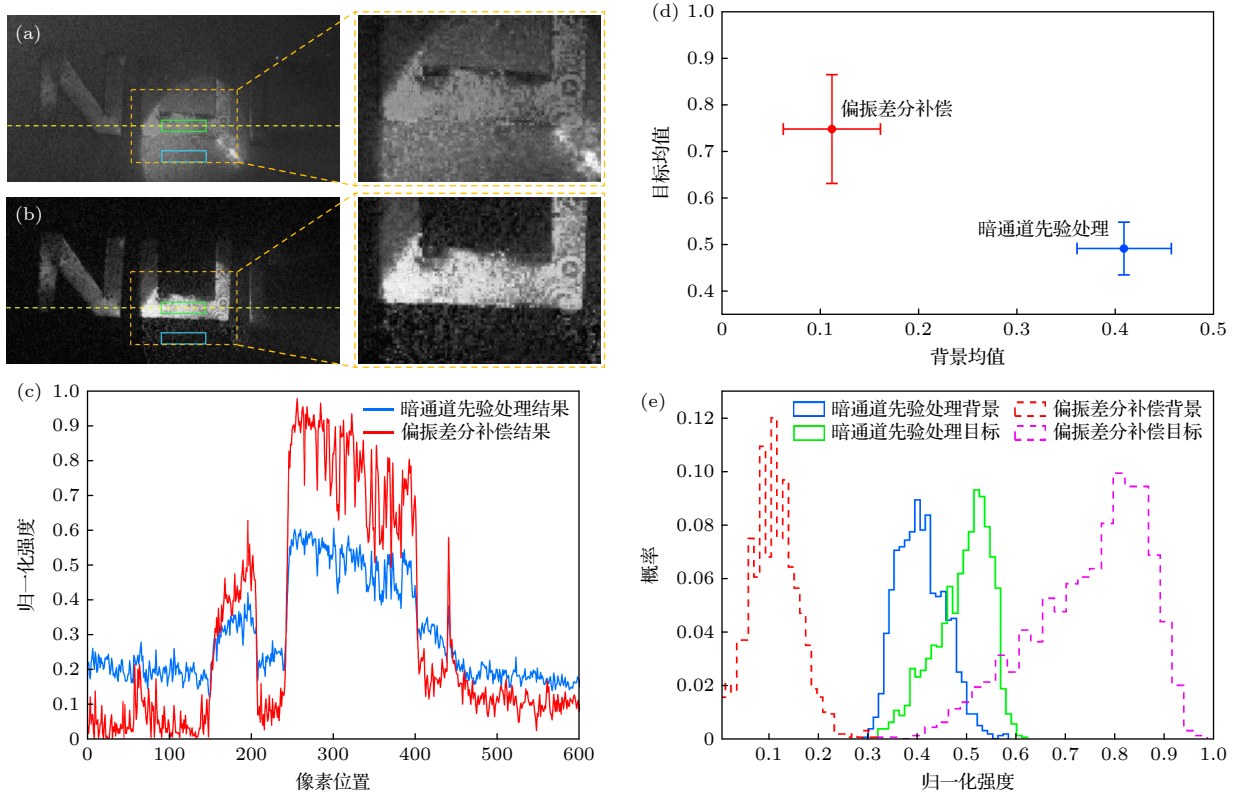


图 6 暗通道先验与偏振差分补偿结果的比较 (a) 暗通道先验处理结果及局部放大; (b) 偏振差分补偿结果及局部放大; (c) 图 (a) 处红色水平线处像素强度剖面对比; (d) 目标均值与背景均值分布; (e) 目标区域与背景区域强度分布

Fig. 6. Comparison of DCP processing and polarization-difference compensation: (a) DCP result with magnified view; (b) compensation result with magnified view; (c) pixel intensity profiles along the red line in panel (a); (d) mean intensities of target and background regions; (e) intensity distributions of target and background regions.

先验处理结果对应的目标均值和背景均值分别为 0.492 和 0.409, 而偏振暗通道差分结果分别为 0.748 和 0.112, 表明经过差分后目标与背景的分离程度显著增大. 图 6(e) 给出了上述目标区域与背景区域的强度分布. 与暗通道先验处理结果相比, 偏振暗通道差分后目标与背景区域的分布由原先的部分重叠转为明显分离, 说明该方法不仅提高了目标响应幅值, 也有效抑制了残余背景波动, 从而增强了目标与背景之间的可分辨性.

为进一步考察差分补偿系数 η 对成像效果的影响, 本文在相同实验数据条件下进行参数扫描分析. 计算过程中, 目标区域和背景区域的选取与图 6(a) 保持一致. η 的取值范围设为 0—1, 步长为 0.1, 成像结果采用对比度指标 C 进行评价. 具体定义为

$$C = \frac{I_T - I_B}{I_T + I_B}, \quad (31)$$

其中 I_T 和 I_B 分别表示目标区域和背景区域的平均强度. 图 7 给出了对比度随差分补偿系数 η 变化的总体趋势, 图中展示了若干代表性参数下的成像结果. 可以看出, 随着 η 由 0 增大至 0.8, 对比度由 0.327 持续提高到 0.867, 并在 $\eta = 0.8$ 时达到最大值. 随着 η 增大, 残余背景分量在差分过程中的抵消作用不断增强, 而目标有效响应得到更好保留, 因此整体对比度持续提升. 当 η 继续由 0.8 增大到 1.0 时, 对比度由 0.867 回落至 0.740, 说明补偿强

度过大后, 目标与背景的分离效果反而下降. 此时虽然背景响应仍在被压低, 但目标有效分量也开始受到削弱, 同时通道噪声和局部失配误差被进一步放大, 最终导致整体成像质量下降. 上述结果说明, 差分补偿系数的选取本质上体现了目标保持与背景抑制之间的平衡关系.

为进一步验证所提方法在不同浑浊介质条件下的稳定性, 图 8 给出了不同光深条件下的成像结果对比, 其中图 8(a) 为原始图像, 图 8(b) 为暗通道先验处理结果, 图 8(c) 为偏振差分补偿结果. 可以看出, 随着光深增大, 原始图像中目标直达光逐渐减弱, 背景散射影响增强, 目标与背景的分离难度明显增大. 经暗通道先验处理后, 图像整体可见性有所改善, 但在目标邻近背景区域仍存在一定残余散射响应. 进一步采用偏振差分补偿后, 目标结构得到增强, 背景区域响应进一步降低. 不同光深条件下对应的最优补偿系数分别为 0.9, 0.8, 0.8, 0.7, 0.7, 归一化对比度 C 分别为 0.799, 0.858, 0.867, 0.842 和 0.811. 上述结果表明, 所提方法在不同浑浊程度和等效散射通道强度下均能够保持较好的目标背景分离能力.

5 结 论

本文将偏振差分补偿引入暗通道先验水下去散射方法, 旨在提升散射环境下的目标探测能力.

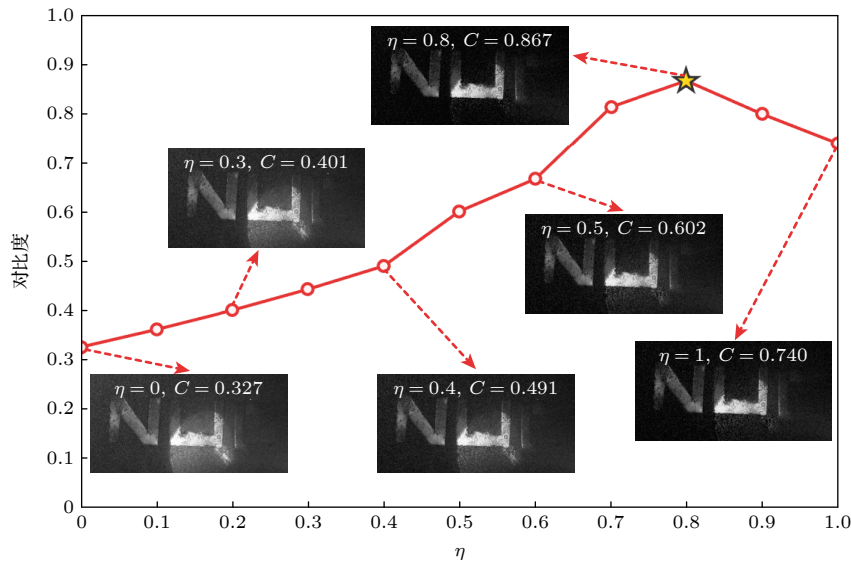


图 7 差分补偿系数变化对结果的影响

Fig. 7. Influence of the differential compensation coefficient on the imaging results.

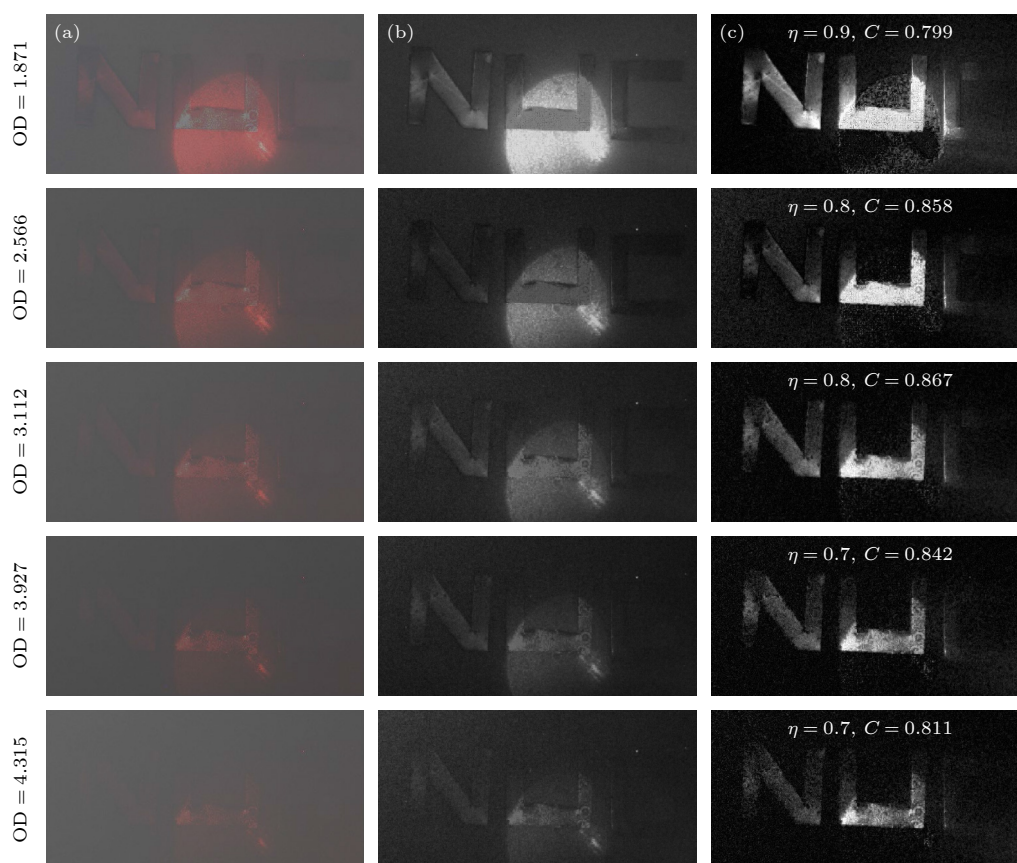


图 8 不同等效光学深度条件下的成像结果对比 (a) 原始图像; (b) 暗通道先验处理结果; (c) 偏振差分补偿结果

Fig. 8. Comparison of imaging results under different equivalent optical depth conditions: (a) Original images; (b) dark channel prior processed results; (c) polarization-difference compensation results.

理论上推导了偏振信息引入暗通道先验模型的过程, 在恢复场景强度信息的同时, 保留并利用了不同偏振检测通道中的响应差异; 进一步引入差分补偿系数, 对两正交通道中的残余背景分量进行匹配调节, 以增强背景抑制能力并改善目标保持效果. 实验构建了与偏振照明相对应的共偏振和交叉偏振检测通道, 并对典型目标与背景组合开展了成像验证. 研究表明, 该方法不仅能够有效抑制散射噪声, 还能够结合偏振信息增强目标与背景的可分辨性; 同时, 差分补偿系数的引入为目标增强与背景抑制之间的权衡提供了可调节手段.

所提方法主要适用于目标与背景强度差异不明显的主动浑浊介质成像场景, 可为水下目标探测、弱目标识别和复杂散射环境下的目标增强提供参考. 需要指出的是, 当浑浊介质散射过强并导致目标直达光严重衰减时, 偏振补偿效果可能会受到限制. 同时, 当前补偿系数的确定仍主要依赖步进扫描方式, 参数选取过程尚未实现自适应优化, 后续可围绕补偿系数的自适应选取进一步开展研究.

参考文献

- [1] Karim S, Tong G, Li J Y, Qadir A, Farooq U, Yu Y T 2023 *Inf. Fusion* **90** 185
- [2] Huo Y S, Zhu C Y F, Dang R C, Hu J Y, Hu B L, Wang Q 2026 *Opt. Lasers Eng.* **196** 109393
- [3] Wei Y, Liu F, Yang K, Han P L, Wang X H, Shao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184202 (in Chinese) [卫毅, 刘飞, 杨奎, 韩平丽, 王新华, 邵晓鹏 2018 物理学报 **67** 184202]
- [4] Jaffe J S 2015 *IEEE J. Ocean. Eng.* **40** 683
- [5] Lotsberg J K, Stamnes J J 2010 *Opt. Express* **18** 10432
- [6] Wang M M, Wang X W, Zhang Y, Sun L, Lei P S, Yang Y Q, Chen J A, He J, Zhou Y 2021 *Opt. Express* **29** 7630
- [7] He K M, Sun J, Tang X 2011 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **33** 2341
- [8] Drews P L J Jr, Nascimento E R, Botelho S S C, Campos M F M 2016 *IEEE Comput. Graph. Appl.* **36** 24
- [9] Peng Y T, Cao K, Cosman P C 2018 *IEEE Trans. Image Process.* **27** 2856
- [10] Zhou J C, Liu D S, Xie X, Zhang W S 2022 *Appl. Opt.* **61** 2915
- [11] Zhou J C, Wang Y Y, Zhang W S, Li C Y 2021 *Opt. Express* **29** 28228
- [12] Ge W Y, Lin Y, Wang Z T, Yang T Y 2022 *Opt. Express* **30** 24295
- [13] Ning Y, Jin Y P, Peng Y D, Yan J 2023 *Opt. Express* **31** 21172
- [14] Tao Y, Chen H G, Peng Z J, Tan R X 2023 *Opt. Express* **31**

- 26697
- [15] Mei X K, Ye X F, Wang J T, Wang X L, Huang H J, Liu Y S, Jia Y P, Zhao S Y 2023 *Opt. Express* **31** 36638
- [16] Le Teurnier B, Tullio A, Boffety M 2025 *Appl. Opt.* **64** 5195
- [17] Hu B, Shan M G, Liu L, Xie Y Q, Li Z B 2025 *Opt. Laser Technol.* **192** 114053
- [18] Huang B J, Liu T G, Hu H F, Han J H, Yu M X 2016 *Opt. Express* **24** 9826
- [19] Liu F, Sun S J, Han P L, Zhao L, Shao X P 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 164201 (in Chinese) [刘飞, 孙少杰, 韩平丽, 赵琳, 邵晓鹏 2021 物理学报 **70** 164201]
- [20] Liu F, Han P L, Wei Y, Yang K, Huang S Z, Li X, Zhang G, Bai L, Shao X P 2018 *Opt. Lett.* **43** 4903
- [21] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K 2003 *Appl. Opt.* **42** 511
- [22] Schechner Y Y, Karpel N 2005 *IEEE J. Ocean. Eng.* **30** 570
- [23] Treibitz T, Schechner Y Y 2009 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **31** 385
- [24] Liu F, Wei Y, Han P L, Yang K, Bai L, Shao X P 2019 *Opt. Express* **27** 3629
- [25] Wei Y, Han P L, Liu F, Shao X P 2021 *Opt. Express* **29** 22275
- [26] Li X B, Xu J N, Zhang L P, Hu H F, Chen S C 2022 *Opt. Lett.* **47** 2854
- [27] Wang J J, Wan M J, Cao X Q, Zhang X J, Gu G H, Chen Q 2022 *Opt. Express* **30** 46926
- [28] Komatsu S, Markman A, Javidi B 2018 *Opt. Lett.* **43** 3261
- [29] Hou W 2009 *Opt. Lett.* **34** 2688
- [30] Li Y F, Ruan R, Mi Z T, Shen X, Gao T Z, Fu X P 2023 *Opt. Lasers Eng.* **165** 107550

Underwater scatter removal using dark channel prior with polarization compensation^{*}

HUO Yongsheng¹⁾²⁾ ZHU Chenyifei^{3)†}

1) (*Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,*

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Frontier Institute of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 12 April 2026; revised manuscript received 25 May 2026)

Abstract

Conventional dark channel prior (DCP) methods can improve the visibility of scattering-degraded images, but their restoration performance is still limited under non-ideal scattering conditions. In particular, errors in background light estimation, transmission estimation, and model approximation may cause residual background scattering to remain in the restored image, thereby reducing the contrast between the target and the background and weakening the detectability of low-contrast targets. To address this problem, a polarization-difference compensation method is introduced into the DCP framework to further suppress the residual background scattering after restoration. Based on the McCartney scattering model, the DCP restoration process is theoretically analyzed, and the residual background scattering term under non-ideal inversion conditions is explicitly derived. The relationship between this residual term and the estimation errors of transmission and background light is clarified. Furthermore, the polarization responses of the target term and residual background term are modeled in two orthogonal polarization channels, and a differential compensation coefficient is introduced to regulate the residual background components in the two channels, thereby improving background suppression while preserving the target response. To validate the proposed method, an active laser polarimetric imaging system is constructed in a turbid medium prepared with diluted Intralipid, and experiments are performed on a representative target-background configuration in which the aluminum target and the compact-disc background have similar reflection intensities but different depolarization responses. Experimental results show that DCP restoration can effectively improve the overall visibility of the degraded image, while the proposed polarization-difference compensation further suppresses the residual background response and enhances the target structure. Compared with the DCP result, the compensated result increases the mean target response from 0.492 to 0.748 and reduces the mean background response from 0.409 to 0.112, leading to a more distinct separation between the target and the background. Under different optical-depth conditions, the normalized contrast values remain within the range of 0.799–0.867, indicating that the method maintains effective target-background separation under different scattering-degradation levels. The results demonstrate that the proposed method can jointly exploit intensity and polarization information to compensate for residual background scattering after DCP restoration, providing a physically interpretable approach for target enhancement and scatter suppression in active imaging through turbid media.

Keywords: dark channel prior, polarization, backscattering suppression, turbid-media imaging

DOI: [10.7498/aps.75.20260512](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260512)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260512](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260512)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62005251).

[†] Corresponding author. E-mail: zbdx_zcyf@163.com

基于偏振差分补偿的暗通道先验水下去散射

霍永胜 朱陈一菲

Underwater scatter removal using dark channel prior with polarization compensation

HUO Yongsheng ZHU Chenyifei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 190405 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260512

CSTR: 32037.14.aps.75.20260512

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260512>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于偏振的暗通道先验去雾

Polarization-based research on a priori defogging of dark channel

物理学报. 2022, 71(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220332>

基于双层多指标优化的水下偏振成像技术

Underwater polarization imaging based on two-layer multi-index optimization

物理学报. 2023, 72(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222017>

基于Stokes矢量差分法的背景光偏振特性研究

Research on polarization characteristics of background light by modified polarization difference imaging method

物理学报. 2023, 72(24): 244201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230639>

偏振复用散射成像

Polarization multiplexing scattering imaging

物理学报. 2023, 72(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230551>

计算偏振彩色傅里叶叠层成像: 散射光场偏振特性的复用技术

Computational polarized colorful Fourier ptychography imaging: a novel information reuse technique of polarization of scattering light field

物理学报. 2024, 73(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240268>

不依赖激发光偏振方向的芯帽异构二聚体

Core-cap heterodimer independent of polarization direction of excitation light

物理学报. 2022, 71(3): 037801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211381>