

基于 Stokes 矢量差分法的背景光偏振特性研究*

徐菁焱¹⁾²⁾³⁾ 吴国俊^{1)2)3)†} 董晶¹⁾²⁾³⁾ 于洋³⁾ 封斐¹⁾³⁾ 刘博¹⁾³⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (青岛海洋科技中心, 青岛 266237)

(2023 年 4 月 19 日收到; 2023 年 9 月 15 日收到修改稿)

水体介质对光线产生的随机散射事件是水下图像发生退化的主要原因, 水下偏振成像技术利用背景散射光和目标信息光的偏振信息差异可有效提升成像信噪比. 然而随着水体中散射事件增多, 光的偏振特性难以保持, 这使得基于偏振特性去除散射的效果也随之降低. 目前水体中背景散射光的偏振规律尚不明晰, 同时缺少对散射光偏振特性定量描述的数据, 因此研究水下散射光的偏振传输特性对水下偏振成像的去散射工作具有重要意义. 为了明确水下背景散射光的偏振特性, 尤其是偏振角信息, 本文提出一种基于 Stokes 矢量差分法的背景光偏振方向研究方法. 本方法基于 Stokes 矢量差分法分析了最优权重系数和 Stokes 矢量差分结果的图像增强测度 (EME) 值的耦合关系, 基于最优权重系数计算背景光偏振角度; 结合实验确定不同浊度水体中最优权重系数与 Stokes 矢量差分法结果的 EME 分布趋势, 探究散射抑制极限, 分析背景散射光偏振方向随水体浊度变化的趋势. 研究结果表明, 所提方法可得到不同水体环境中背景散射光的确切偏振角度, 揭示了背景散射光的偏振方向随水体浊度的上升呈现与入射光偏振方向正交的趋势. 本文研究为确定水下成像背景散射光的偏振方向提供了方法依据.

关键词: 偏振, 水下成像, 散射, 光学信息处理

PACS: 42.25.Ja, 42.25.Dd, 42.25.Fx, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.72.20230639

1 引言

水下光学成像技术具有探测结果信息直观, 分辨率高的特点, 是观探海洋的重要手段. 然而水体对光的散射作用使背景散射光难以和目标信息分离, 严重降低水下成像质量, 限制水下探测距离. 因此探究水中散射光的光学特性, 实现背景散射光的抑制甚至去除, 提高水下图像的信噪比, 是提升水下光学成像技术探测性能的重要任务. 水下偏振光成像技术利用目标物信息光和背景散射光的偏振差异, 可实现优于普通光学探测结果的高对比度

探测, 且偏振成像系统质量体积轻巧, 便于搭载水下无人设备, 成本低廉, 已成为目前提升水下探测结果信噪比的重要方法^[1-3].

背景光的偏振信息在水下偏振图像复原领域里是一项重要的参数, 然而这一参数大多基于假设偏振状态, 或利用一个粗略的估计值代入到成像模型中开展复原计算. Cariou 等^[4]通过设置参考信号光路研究含高岭土颗粒水体的散射信号, 发现后向散射光通常为线偏振光, 且偏振方向与入射光的偏振方向相同. Sabbah 和 Shashar^[5]通过使用急流取样偏振仪进行水下实测分析得出, 水下成像过程中后向散射光为部分偏振光. Cronin 和 Marshall^[6]

* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)(批准号: XDA22030201) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuguojun@opt.ac.cn

指出大多数水下散射光产生的偏振在方向上接近水平, 因此使用水平偏振器拍摄的图像明显比使用垂直方向的偏振器拍摄的图像更模糊. 这些对背景光偏振特性的先验性结论为基于水下物理成像模型的主被动偏振图像复原^[7-10]奠定了理论基础. 然而对背景散射光的偏振部分和非偏振部分进行理论化分离并不能实现对其偏振特性的定量分析. 为更深入研究水中背景散射光的偏振特性, 研究人员以偏振度 (degree of polarization, DOP) 为参量开展了背景散射光在水体中传输的模拟研究和实验研究, 如基于蒙特卡罗仿真获取理论上散射光在水中传播时, 其 DOP 随光学厚度的变化^[11]; 研究线偏光、圆偏光在不同浑浊水体中传播时, 其散射光的保偏性^[12,13]; 定量分析前向、后向散射光在不同浊度水体中的退偏振程度^[14,15]等. 着眼于微观角度, 孙晶华^[16]模拟分析了藻类和泥沙的大小颗粒在水体中的后向散射的极化分布情况以及后向散射极化程度随浊度的变化情况; 着眼于宏观角度, 田恒团队^[17,18]从马吕斯定律的角度出发, 提出背景光偏振方向取决于其偏振度并且可由 Stokes 矢量估算范围, 该范围为 $\frac{1-P}{1+P} \leq \cos^2\alpha \leq 1$, 其中 P 表示背景光的 DOP, α 表示背景光偏振角度. 实际上, 无论是偏振光自身在水体之中产生退偏振, 还是自然光在水体中传播经多次散射后具备了偏振特性, 其主要原因是原本偏振态的极化方向发生了改变. 因此量化背景散射光的偏振角度变化, 尤其是不同水质中的极化变化情况, 是掌握背景散射光的偏振传输特性的重点, 也有望实现水下探测结果的理想去散射的可行研究方向.

为了进一步探究背景散射光的偏振特性, 尤其是偏振角度这一参量, 本文提出了一种基于 Stokes 矢量差分法 (modified polarization difference imaging method, M-PDI)^[17,18] 的背景光偏振方向研究方法. 首先量化分析 M-PDI 和普通差分方法 (polarization difference imaging, PDI)^[19] 的差异. 随后基于 M-PDI 的水下物理模型遍历寻找与偏振角度相关的最优权重系数, 利用最优权重系数和偏振角的数学关系反演背景光偏振方向, 获取背景散射光的确切偏振角度. 最后通过改变水体浊度, 分析了 M-PDI 对散射光的抑制极限, 探究了背景散射光的偏振角度随水体浊度变化的分布规律.

2 基于 M-PDI 的背景光偏振方向研究

2.1 M-PDI 原理

Stokes 矢量用于描述光的偏振状态, 表示为 $S = (I, Q, U, V)^T$, 其右上角标 T 表示转置. I 代表光的强度, Q 代表 0° 和 90° 偏振方向光强差值, U 代表 45° 和 135° 偏振方向光强差值, V 代表右旋偏振光和左旋偏振光的强度差值. 基于 Stokes 矢量可以计算出光场的 DOP, 即光束中偏振光的能量占总能量的比例, 可以表示为

$$P_{\text{DOP}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \quad (1)$$

也可描述光束矢量振动方向, 即偏振角 (angle of Polarization, AOP), 可以表示为

$$\alpha_{\text{AOP}} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (2)$$

背景散射光 (B) 与目标信息光 (T) 在偏振方法中有图 1 所示的几何关系. P_1 和 P_2 为偏振器件, β 为 T 的偏振角, α 为 B 的偏振角. 定义经起偏器 P_1 入射的光为 I_\perp , 经检偏器 P_2 出射的光为 $I_{//}$. 当背景光的偏振方向 α 和相互正交的 P_1, P_2 的透射方向均成 45° 时, 可实现背景散射光的滤除.

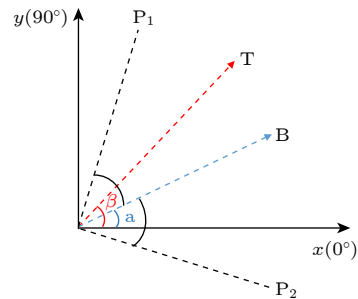


图 1 偏振差分探测原理^[17]

Fig. 1. Detection principle of polarization difference imaging^[17].

T 和 B 的 Stokes 矢量形式可以表达为

$$S(T) = \begin{bmatrix} I(T) \\ Q(T) \\ U(T) \\ V(T) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$S(B) = \begin{bmatrix} I(B) \\ Q(B) \\ U(B) \\ V(B) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

一般用斯托克斯-穆勒矩阵 (Stokes- Muller matrix) 来描述入射光与光路中物体的作用过程, 能改变光偏振态的偏振器件也有着固定的穆勒矩阵表述^[20]. 反射光携带目标物偏振信息这一物理过程可表示为

$$\mathbf{S}_{\text{reflect}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (5)$$

其中 \mathbf{M} 表示目标物的穆勒矩阵, $\mathbf{S}_{\text{reflect}}$ 和 \mathbf{S}_{in} 分别表示反射光和入射光的偏振信息. 这一物理过程具有累乘特性, 当光路中存在多个物体时, 最终的输出光可表示为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_1 \cdots \mathbf{M}_n \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{S}_{in} 表示输入光, \mathbf{S}_{out} 表示最终输出光, \mathbf{M}_n 表示光路内所经物体的穆勒矩阵, n 表示数目. 因此入射光经过相互正交的偏振器件调制后获得的输出光强将表示为

$$I_{//}(\mathbf{B}) = \frac{I(\mathbf{B}) + Q(\mathbf{B}) \sin(2\alpha) - U(\mathbf{B}) \cos(2\alpha)}{2}, \quad (7a1)$$

$$I_{\perp}(\mathbf{B}) = \frac{I(\mathbf{B}) - Q(\mathbf{B}) \sin(2\alpha) + U(\mathbf{B}) \cos(2\alpha)}{2}, \quad (7a2)$$

$$I_{//}(\mathbf{T}) = \frac{I(\mathbf{T}) + Q(\mathbf{T}) \sin(2\alpha) - U(\mathbf{T}) \cos(2\alpha)}{2}, \quad (7b1)$$

$$I_{\perp}(\mathbf{T}) = \frac{I(\mathbf{T}) - Q(\mathbf{T}) \sin(2\alpha) + U(\mathbf{T}) \cos(2\alpha)}{2}, \quad (7b2)$$

将 (7) 式进行差分运算可得

$$I(\mathbf{B}) = I_{//}(\mathbf{B}) - I_{\perp}(\mathbf{B}) = 0, \quad (8a)$$

$$I(\mathbf{T}) = I_{//}(\mathbf{T}) - I_{\perp}(\mathbf{T}) = Q(\mathbf{T}) \sin(2\alpha) - U(\mathbf{T}) \cos(2\alpha). \quad (8b)$$

最终 M-PDI 的输出结果为

$$I_{\text{M-PDI}} = I(\mathbf{T}) + I(\mathbf{B}) = Q \sin(2\alpha) - U \cos(2\alpha). \quad (8)$$

2.2 背景散射光偏振方向研究方法

为获取背景光偏振角度信息, 将偏振角的定义 (2) 式进行变换, 可得背景光有如下表达式:

$$Q(\mathbf{B}) - U(\mathbf{B}) \frac{1}{\tan(2\alpha)} = 0. \quad (9a)$$

同理, 对目标信号光处理后可得

$$Q(\mathbf{T}) - \frac{1}{\tan(2\alpha)} U(\mathbf{T}) = \frac{1}{\sin(2\alpha)} (Q(\mathbf{T}) \sin(2\alpha) - U(\mathbf{T}) \cos(2\alpha)). \quad (9b)$$

因此 M-PDI 方法可以表示为

$$I_{\text{M-PDI}} = Q - \frac{1}{\tan(2\alpha)} U, \quad (10)$$

可将 (10) 式写为 $I_{\text{M-PDI}} = Q - \gamma U$, γ 称之为权重系数. 当 $\gamma = 1/\tan(2\alpha)$ 时为 M-PDI 方法的最优权重系数, 对应着最佳探测效果. 为了确定最优权重系数的确切数值, 需要对 M-PDI 的输出结果进行量化描述, 本方法选取图像增强测度^[21] (enhancement measure evaluation, EME) 作为量化标准. EME 是描述图像清晰度变化的重要指标, 其数学表达为

$$E_{\text{EME}} = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{I_{\text{max},k,l}(x,y) + 1}{I_{\text{min},k,l}(x,y) + 1}, \quad (11)$$

式中, x, y 为像素的坐标值, 其原理为把图像分为 $k_1 \times k_2$ 块小区域 (l 和 k 为行列编号), 计算出小区域中灰度最大值和最小值的对数均值, 表现的是图像局部域灰度的变化程度. 局部灰度变化越强, 图像表现出的细节就越强.

首先将 Stokes 矢量图像 Q 和 U 代入 M-PDI 模型中, 然后将模型输出结果 $I_{\text{M-PDI}}$ 的 EME 最大设为最优判断指标, 以此对权重系数 γ 进行最优值搜寻. 在线偏振光入射情况下, 权重系数范围为 (0, 1), 因此设置 0.01 为搜索步长寻找 EME 最高时的权重系数. 完成遍历流程即可确定最优权重系数. 随后根据 $\gamma = 1/\tan(2\alpha)$ 对最优权重系数取反, 获得此时背景光偏振方向角 α . 上述方法整体流程如图 2 所示. 最后将不同浊度条件下的 Stokes 矢量图像 Q_i 和 U_i ($i = n$) 代入上述方法, 研究背景光偏振方向角度随水体浊度变化的趋势.

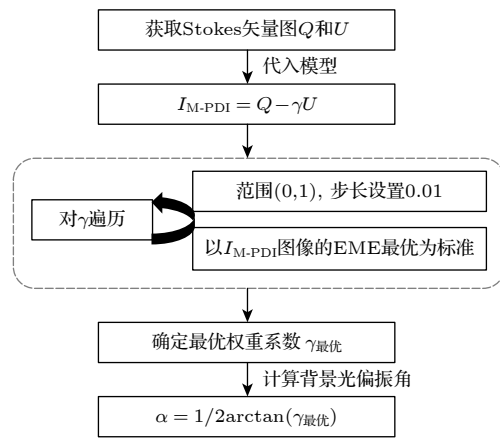


图 2 基于 M-PDI 的背景光偏振方向研究方法流程图

Fig. 2. Flow chart of research method for polarization direction of background light based on M-PDI.

2.3 实验平台搭建与图像采集

实验布局及装置如图 3 所示, 包括 LED 光源、线偏振片、玻璃水箱、成像目标和偏振相机. LED 光源型号为恒洋光学 GI-060403, 功率为 3 W, 波长 532 nm; 线偏振片为恒洋光学 GSP-25, 通光孔径为 25.4 mm, 消光比为 1:1000, 设计波长为 400—700 nm; 水箱大小 45 cm×45 cm×12 cm. 目标物为金属硬币, 相机为 Lucid 偏振相机, 采用 Sony IMX250 MZR CMOS (Mono) 传感器, 分辨率 2448 pixels × 2048 pixels, 帧率 22 fps, 可同时拍摄 4 个不同的定向偏振图像 (0°, 45°, 90°, 135°), 配置镜头参数为 35 cm 定焦.

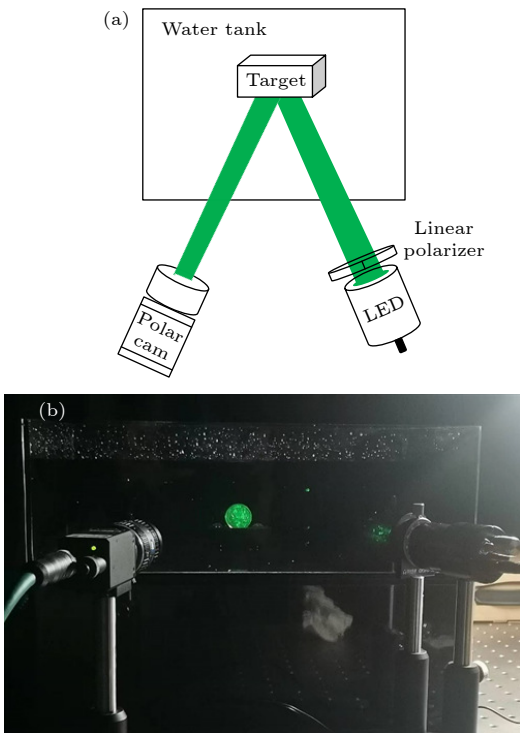


图 3 实验室光路搭建示意图 (a) 理论实验示意图; (b) 实验室光路

Fig. 3. Schematic diagram of laboratory light path construction: (a) Schematic diagram of theoretical experiment; (b) laboratory light path.

根据《水质-浊度测定》(GB13200-1991) 和《海水-浑浊度的测定-目视比色法》(F-HZ-DZ-HS-0053), 目前一般采用福尔马肼、硅藻土或高岭土来配置浊度溶液. 高岭土化学式为 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 具有优良的光散射能力, 成分与天然浑浊水体具有相似性^[22]. 一个浊度 (NTU) 的定义为 1 L 水中含有 1 mg 杂质, 使用高岭土配置散射介质时, 1 mg/L 高岭土悬浊液呈现浊度为 1 NTU. 因此本

研究使用高岭土调配不同浊度的水体环境, 且本实验中仅将高岭土颗粒视为杂质. 在水槽中注入 10 L 清水, 使用电子天平按照每 2 NTU 为梯度进行浊度液体配置, 水槽 3 个侧面和底面皆有黑色覆盖物以避免环境光的干扰和水箱壁的反射. 在光源后放置线偏振片作为起偏器获取线偏振光源射入注水水槽中, 将目标物置于水槽之中. 目标物距与探测器间距离为 35 cm, 其中置于水中的距离为 15 cm, 置于空气中的距离为 20 cm. 光源与目标物间距离为 35 cm, 其中置于水中的距离为 15 cm, 置于空气中的距离为 20 cm. 入射光路和出射光路之间夹角为 40°, 探测角度应避免接收目标物的镜面反射光. 目标物反射光通过浑浊水体后被偏振相机接收, 在电脑端输出探测结果.

3 实验结果与讨论

3.1 M-PDI 方法结果

在实验室搭建的探测环境中获取 Stokes 矢量图 Q 和 U . 通过改变水体浊度这一变量, 开展普通光学探测方法和 M-PDI 的对比实验, 实验结果如图 4 所示, 图 4(a)—(d) 为普通光学探测方法的结果, 图 4(e)—(h) 为 M-PDI 的结果. 随着水体环境浊度的升高, 两种方法中的目标信息光都随着散射光的增强而逐渐隐匿, 但 M-PDI 结果目标的轮廓、细节信息和图像对比度明显始终优于普通光学探测方法结果. 尤其是在高散射条件下, 普通成像方式几乎无法分辨出目标物信息时, M-PDI 的结果在高浊度条件下仍能区分目标物轮廓和大量的表面细节信息. 这表明 M-PDI 可以除去部分散射光对水下成像的影响, 改善图像质量.

为了更加直观精准地判断两种方法结果的差异, 本文计算了两组结果的 EME 值开展定量分析, 结果如表 1 所列.

表中数据结果说明, M-PDI 结果的 EME 值始终显著优于普通光学探测方法结果. 在表中所示的 4 种浊度条件下, M-PDI 结果的 EME 值分别是普通光学探测方法结果的 1.85 倍、1.84 倍、2.14 倍、3.03 倍. 通过上述对比分析说明, M-PDI 可有效抑制水下成像过程中散射光带来的影响, 且在浑浊水体中更具有适应性, 有效提升水下目标的探测能力.

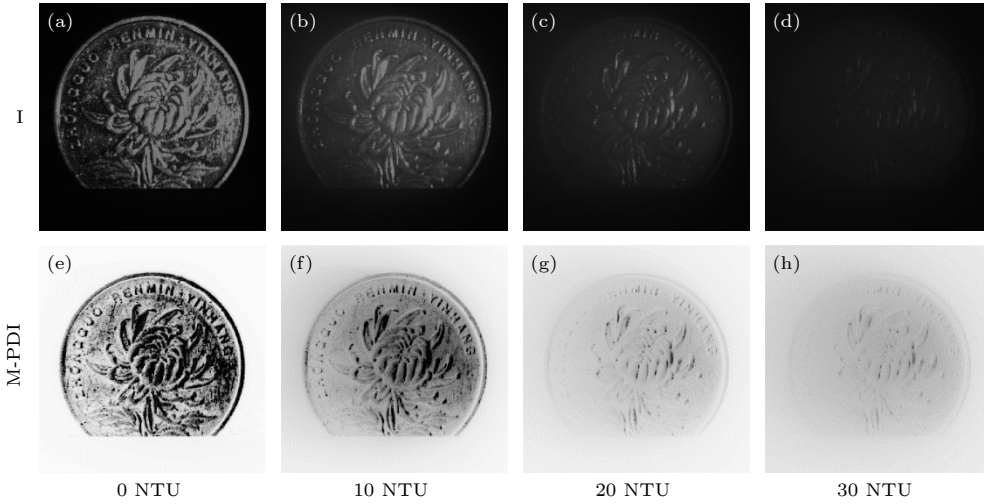


图 4 0, 10, 20, 30 NTU 条件下传统探测结果和 M-PDI 探测结果对比

Fig. 4. Comparison between traditional detection results and M-PDI detection results under the conditions of 0, 10, 20 and 30 NTU.

表 1 传统探测结果和 M-PDI 探测结果 EME 值对比

Table 1. Comparison of EME values between traditional detection results and M-PDI detection results.

Types of turbidity/NTU	Normal detection result/EME	M-PDI detection result/EME
0	6.6119	12.2156
10	2.4624	4.5323
20	1.6951	3.6281
30	1.4843	4.5022

3.2 M-PDI 输出结果 EME 值与 γ 的关系

实质上, 权重系数 γ 反映的是 Stokes 矢量中 Q 和 U 之间的耦合情况, 其取值范围为 (0, 1). 图 5 显示了浊度为 20 NTU 时 M-PDI 结果的 EME 值随 γ 变化的曲线. 由图 5 可知, 当 γ 为 0.71 时为最优权重系数, 成像结果具有最大的清晰度, EME 值为 3.6281, 这表明 Stokes 矢量中 Q 和 U 之间此时具有最佳的耦合效果.

3.3 γ 随水体浊度变化的规律

本研究进一步探究了不同浊度水体条件下 γ 和 EME 值的变化情况. 为确定参数的变化趋势, 设置浊度梯度为 2 NTU, 分别对 0—38 NTU 的浊度范围进行偏振探测, 并对获取的实验结果进行了分析, 如图 6 所示. 设置 38 NTU 为截止是考虑整个探测过程为恒定曝光, 在 34 NTU 条件下视场中已经看不到目标物信息, 再顺延 2 组数据以做过渡.

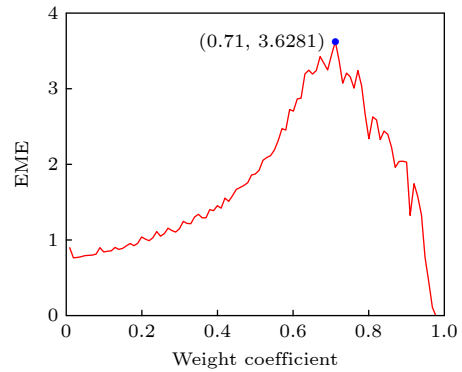


图 5 20 NTU 水体中 M-PDI 输出结果 EME 值与权重系数 γ 的关系

Fig. 5. Relationship between EME value and weight coefficient γ of M-PDI output results in 20 NTU.

图 6 每个子图中的曲线峰值点, 对应的横坐标值即为最优权重系数. 在浊度较低条件下 (0—10 NTU), 最优权重系数保持在 0.01 不变. 在 10—12 NTU 条件下, 最优权重系数发生突变, 由 0.01 变化至 0.45, 此后最优权重系数随着浊度的升高而逐渐增大, 如图 7 所示.

当背景散射光的偏振方向 α 与正交偏振器件的方向各成 45° 时, 背景散射光便可以被完全抑制, 但这是较为理想的情况. 在实际的探测过程中, 由于前向散射和后向散射的偏振差异、以及所用仪器自身限制等原因, 探测结果中背景散射光难以做到完全的抑制. 尤其当水体的浊度增大时, 水体环境带来的散射强度将远超过差分成像方式本身对散射光的抑制能力. 由图 7 数据的变化趋势可知, 在低浊度范围条件下, 此时背景散射光的强度尚在

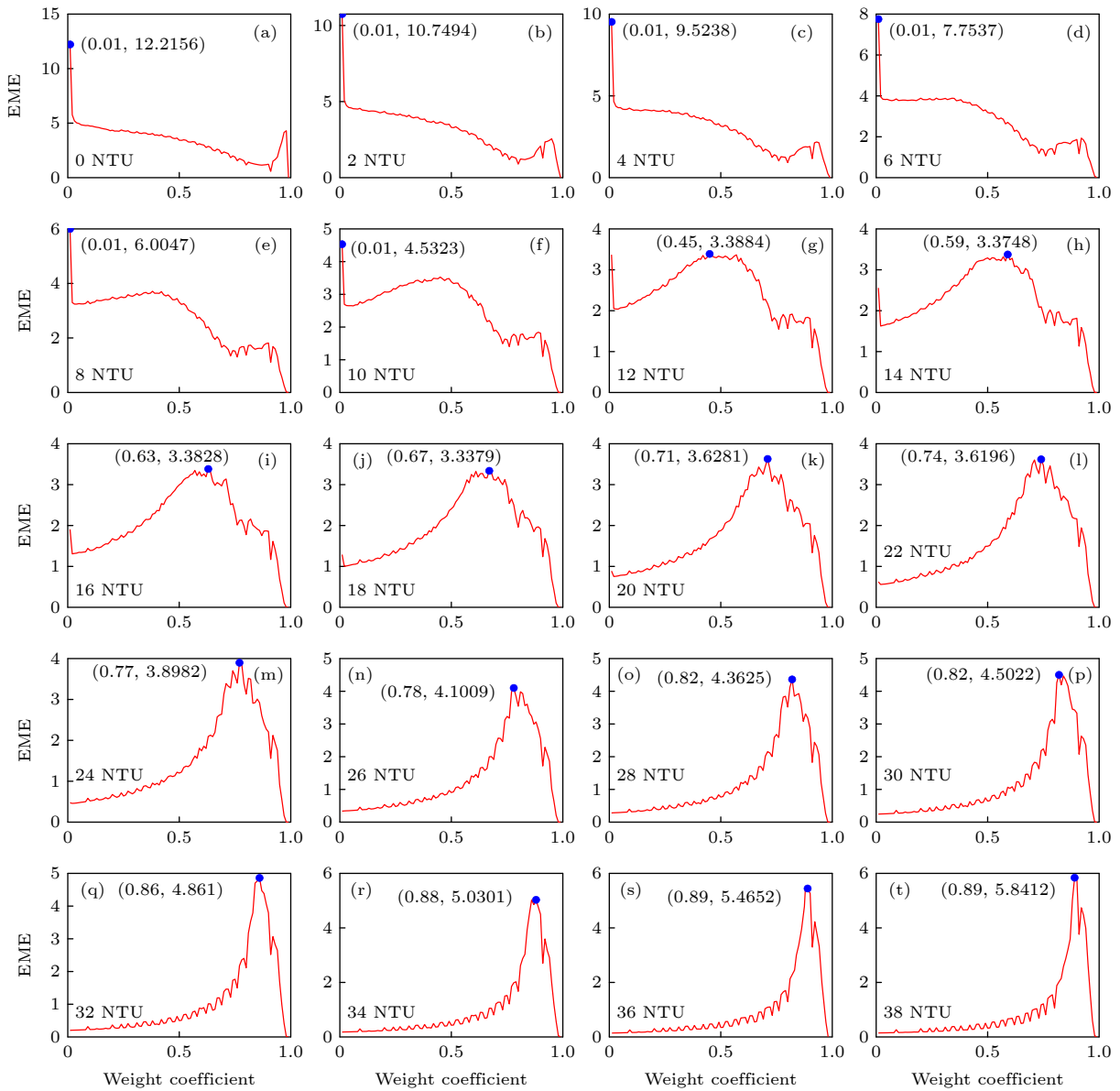


图 6 0—38 NTU 范围内 γ 和 EME 值的变化情况

Fig. 6. Changes of γ and EME values in the range of 0–38 NTU.

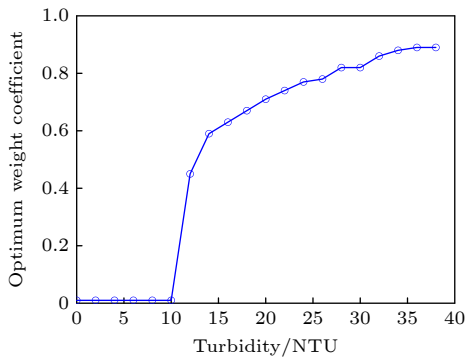


图 7 最优权重系数在不同浊度下的变化趋势

Fig. 7. Variation trend of optimal weight coefficient under different turbidity.

M-PDI 的抑制极限范围内, 因此在 0—10 NTU 条件下的结果中, 最优权重系数保持不变, 表征为 0.01。但随着水体浊度的增大, 背景散射光的强度超越了 M-PDI 本身的抑制极限, 背景散射光的影响显化, 因此最优权重系数由 0.01 突变为 0.45, 此后在中高浊度条件下, EME 与 γ 的相关曲线呈现出新的分布趋势。

图 6 数据表明 EME 值随浊度的增大逐渐降低, 达最低点后出现小幅上升现象, 如图 8 所示。探测器能够获取目标物信息代表目标物反射光成功传播到探测器接收面, 因此基于偏振的探测方法代表接收端收到的光学信息是具备偏振特性的。

不同的探测距离,接收面将接收到不同类型的光子.理想的条件是近距离探测,此时接收面可以接收到各种散射光子,例如非散射光子、单次散射光子、少量多次散射光子.随着介质长度的增大,探测器和目标物之间的光学长度增大,多次散射事件的数量增多,光线发生退偏振现象,这对应了水体浊度增大,结果的 EME 值整体呈现下降趋势并降到一个最低点的现象.在高浊度条件下实质上是等效了更远的探测距离,此时光子经历多次散射,大部分已经无法传播到接收端,此时接收端能够接收到的目标物信息大部分是少量的沿直线传播的弹道光子,其依旧保留着原始的偏振特性,因此输出结果在此条件下会出现 EME 值的小幅度回升现象.

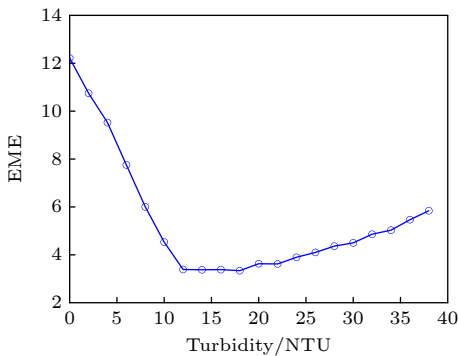


图 8 EME 在不同浊度下的变化趋势
Fig. 8. Trend of EME under different turbidity.

3.4 背景光偏振方向的变化规律

在获取不同浊度条件下的最优权重系数后,算出对应的背景光偏振方向 α , 获得表 2 所列数据.

表 2 不同浊度条件背景光偏振方向变化数据
Table 2. Data on the variation of background light polarization direction under different turbidity conditions.

Turbidity/NTU	α	Turbidity/NTU	α
0	44°42'49"	18	28°5'20"
2	44°42'49"	20	27°18'45"
4	44°42'49"	22	27°44'57"
6	44°42'49"	24	26°12'7"
8	44°42'49"	26	26°1'22"
10	44°42'49"	28	25°19'27"
12	32°53'10"	30	25°19'27"
14	29°43'47"	32	24°39'80"
16	28°53'40"	34	24°29'34"

在低浊度条件下,基于最优权重系数计算出背景光偏振方向约为 45° , 该角度契合偏振差分方法中背景散射光与起偏器和检偏器间夹角互为 45° 实现共模抑制的理论关系.随着水体浊度的提升,该角度不断减小,逐渐趋于平行检偏器的方向,即呈现出与入射光偏振方向正交的趋势.值得强调的是,基于这种方法可以说明低浊度条件的背景光一直是被抑制的状态,基于本文构建的实验条件,抑制极限约为 10 NTU.但是随着水体浊度的增大,背景光的影响逐渐显化,因此还需要结合其他手段才能对背景光进行进一步的抑制或者去除.此外,本文所提的抑制极限并非指 0 NTU 和 10 NTU 条件下可以得到相同清晰度的结果,而是指散射事件累计导致宏观偏振角度变化的极限.

为确保本研究结果的适应性,研究过程中开展了多次重复实验,包括更改目标物与光源、探测器在水中和空气中的距离,此处不再赘列数据.实验结果表明,空气介质中的距离改变对偏振信息几乎没有影响;水体介质中的距离改变时,若光经历的平均散射次数^[23]近似,则背景光的偏振信息基本一致,因此 γ 和 EME 值的整体分布趋势不变,背景散射光的偏振方向变化趋势也不变;光源和目标物间的距离改变,只会影响目标物表面接收的光辐射强度,不会影响实验结果的整体变化趋势.

4 结 论

本文基于 Stokes 矢量差分法分析了最优权重系数和 M-PDI 结果的 EME 值的耦合关系,提出了利用最优权重系数确定背景光偏振方向的研究方法.结合实验分析了 M-PDI 方法和普通水下光学成像方法的差异;研究了不同浊度水体中最优权重系数与 M-PDI 方法结果图像的 EME 分布趋势,基于最优权重系数计算背景光偏振角度;探究了 M-PDI 方法对背景散射光的抑制极限;最后分析了背景散射光偏振方向随水体浊度变化的趋势.研究表明, M-PDI 方法可有效抑制水下成像过程中散射光带来的影响且在浑浊水体中更具有适应性;在低浊度范围和高浊度范围条件下,权重系数和 M-PDI 结果的 EME 值存在不同的分布趋势; M-PDI 方法在低浊度条件时对背景散射光有很好的抑制效果,浊度升高后散射作用会重新显化并逐渐增强;背景散射光的偏振方向随水体浊度的上升

呈现与入射光偏振方向正交的趋势.

本研究为确定水下成像背景散射光的偏振方向提供了方法依据. 确定的背景散射光偏振信息可为水下光学成像的去散射工作提供思路. 例如, 可以根据背景散射光的偏振方向在高浊度水体中的角度特征, 在工程硬件方面设计合理的偏振接收角度, 在探测端避免或减小散射光的影响. 还可以将 M-PDI 方法的结果与其他去散射算法结合, 如暗通道去雾算法 (UDCP)、水下偏振复原算法 (CUV) 或改进的偏振去雾算法 (IDP) 等, 进一步提升水下光学图像的信噪比, 从而提高水下目标的探测和识别效率.

参考文献

- [1] 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
- [2] Han P L, Liu F, Zhang G, Tao Y, Shao X P 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 054202 (in Chinese) [韩平丽, 刘飞, 张广, 陶禹, 邵晓鹏 2018 物理学报 **67** 054202]
- [3] Yang L M, Liang J, Zhang W F, Ju H J, Ren L Y, Shao X P 2019 *Opt. Commun.* **438** 96
- [4] Cariou J, Le J B, Lotrian J, Guern Y 1990 *Appl. Opt.* **29** 1689
- [5] Sabbah S, Shashar N 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 2049
- [6] Cronin T W, Marshall J 2011 *Phil. Trans. R. Soc. B* **366** 619
- [7] Schechner Y Y, Karpel N 2004 *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04* Kobe, Japan, November 9–12, 2004 p1255
- [8] Schechner Y Y, Karpel N 2004 *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* Washington, DC, USA, 27 June, 2004 p536
- [9] Karpel N, Schechner Y Y 2004 *Conference on Polarization - Measurement, Analysis, and Remote Sensing VI* Bellingham, WA, July 15, 2004 p106
- [10] Treibitz T, Schechner Y Y 2009 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **31** 385
- [11] He J H, Duan J, Zhan J T, He L Q, Cai L J, Zhang S 2021 *Laser Optoelectron. Prog.* **58** 0529002 (in Chinese) [贺敬航, 段锦, 战俊彤, 赫立群, 蔡立娟, 张肃 2021 激光与光电子学进展 **58** 0529002]
- [12] Van der Laan J D, Strymgeour D A, Kemme S A, Dereniak E L 2015 *Appl. Opt.* **54** 2266
- [13] Hu H, Zhao L, Li X, Wang H, Yang J, Li K, Liu T 2018 *Opt. Express* **26** 25047
- [14] Chen Y W 2003 *Opt. Optoelectron. Technol.* **56** 1719 (in Chinese) [陈养渭 2003 光学与光电技术 **56** 1719]
- [15] Chen Y W 2000 *Ship Electro. Eng.* **20** 15 (in Chinese) [陈养渭 2000 舰船电子工程 **20** 15]
- [16] Sun J H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [孙晶华 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [17] Guan J G, Zhu J P, Tian H, Hou X, 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224203 (in Chinese) [管今哥, 朱京平, 田恒, 侯洵 2015 物理学报 **64** 224203]
- [18] Tian H, Zhu J, Tan S, Zhang Y, Zhang Y, Li Y, Hou X 2018 *Opt. Laser Technol.* **108** 515
- [19] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, Engheta N 1996 *Appl. Opt.* **35** 1855
- [20] Golestein D 2003 *Polarized Light* (2nd Ed.) (New York: Marcel Dekker) pp89, 90
- [21] Agaian S S, Panetta K 2001 *IEEE. T. Image Process.* **10** 367
- [22] Chen X W, Yin G F, Zhao N J, Gan T T, Yang R F, Zhu W, Liu J G, Liu W Q 2019 *Spectrosc. Spect. Anal.* **39** 2912 (in Chinese) [杨晓伟, 殷高方, 赵南京, 甘婷婷, 杨瑞芳, 祝玮, 刘建国, 刘文清 2019 光谱学与光谱分析 **39** 2912]
- [23] Ntziachtistos V 2010 *Nat. Meth.* **7** 603

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

Xu Jing-Han¹⁾²⁾³⁾ Wu Guo-Jun^{1)2)3)†} Dong Jing¹⁾²⁾³⁾
Yu Yang³⁾ Feng Fei¹⁾³⁾ Liu Bo¹⁾³⁾

1) (*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) (*Qingdao Ocean Science and Technology Center, Qingdao 266237, China*)

(Received 19 April 2023; revised manuscript received 15 September 2023)

Abstract

The random scattering event of light by water medium is the primary reason for the degradation in underwater imaging. Underwater polarization imaging technology can enhance the signal-to-noise ratio of imaging effectively by utilizing the polarization information difference between background scattered light and target light. However, as scattering events increase in the water body, it is difficult to maintain the polarization characteristics of light, which reduces the effect of removing scattering based on polarization characteristics. In addition, the polarization rule of background scattered light in water is unclear, and there is a lack of quantitative description of the polarization characteristics of scattered light. Therefore, the study of polarization transmission characteristics of underwater scattered light is of great significance in reducing the scattering light of underwater polarization imaging.

In order to clarify the polarization characteristics of underwater background scattered light, especially the polarization angle information, this paper proposes a method for ascertaining polarization angle of background light based on modified polarization difference imaging method. In this method, the coupling relationship between optimal weight coefficient and enhancement measure evaluation (EME) value of the Stokes vector difference result is analyzed, and the background light polarization angle is calculated based on the optimal weight coefficient. Combined with the experimental results, the EME distribution trend of the optimal weight coefficient and the modified polarization difference imaging method results in different turbidity water bodies are determined, the scattering suppression limit is explored, and the trend of background scattered light polarization direction with turbidity of water is analyzed. The results show that the proposed method can obtain the exact polarization angle of background scattered light in different water environments, revealing a trend that the polarization direction of background scattered light becomes orthogonal to the incident light direction as the turbidity of the water increases. This research provides a methodological basis for determining the polarization direction of the background scattered light in underwater imaging.

Keywords: polarization, underwater imaging, scattering, optical information processing

PACS: 42.25.Ja, 42.25.Dd, 42.25.Fx, 42.30.-d

DOI: [10.7498/aps.72.20230639](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230639)

* Project supported by the Special project of strategic leading science and technology of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA22030201).

† Corresponding author. E-mail: wuguojun@opt.ac.cn



基于Stokes矢量差分法的背景光偏振特性研究

徐菁焱 吴国俊 董晶 于洋 封斐 刘博

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

Xu Jing-Han Wu Guo-Jun Dong Jing Yu Yang Feng Fei Liu Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 244201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230639

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230639>

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

基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究

Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging

物理学报. 2021, 70(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210314>

融合偏振信息的多孔径水下成像算法

Multiple aperture underwater imaging algorithm based on polarization information fusion

物理学报. 2020, 69(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200471>

多尺度水下偏振成像方法

Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging

物理学报. 2018, 67(5): 054202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172009>

浅海被动水下偏振成像探测方法

Passive underwater polarization imaging detection method in neritic area

物理学报. 2018, 67(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180692>

基于散斑光场偏振共模抑制性的宽谱散射成像技术

Broadband scattering imaging technology based on common-mode rejection of polarization characteristic

物理学报. 2021, 70(22): 224203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210703>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>