

文章编号: 1007-5461(2003)01-0080-05

混浊介质中利用后向散射光偏振进行目标识别的研究

仇英辉, 刘建国, 魏庆农, 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 混浊介质中的目标识别是一项很有实用价值的研究课题。本文中作者提出利用混浊介质中目标物体后向散射光米勒矩阵的方法来进行目标识别的方法。在去离子水中加入 $0.1\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯乳胶颗粒组成理想的混浊介质, 在各种浓度下分别测量混浊介质中有目标物体时的米勒矩阵与混浊介质没有目标物体时的米勒矩阵, 将这两个矩阵进行比较, 发现米勒矩阵的主对角线项在有目标物体和没有目标物体时有一定的差异, 利用这一差异可以判断混浊介质中是否存在目标物体。作者对这种方法进行了实验室条件下的模拟, 实验结果表明利用偏振技术进行目标识别比利用传统的强度识别方法有效, 并且有一定的实用价值。

关键词 后向散射; 米勒矩阵; 偏振

中图分类号: O436.2; TN249

文献标识码: A

1 引 言

利用主动成像系统在混浊介质中如沿岸海水、雾、云中探测的最大距离受介质的吸收特性及散射特性的限制。在介质吸收占优势时, 通过提高光源的强度或提高探测器的灵敏度都可以提高探测距离。然而, 在很多情况下, 主动成像系统不是受介质吸收的限制而是由于介质的后向散射光进入了探测器^[1,2], 介质的后向散射光减小了物体与其周围环境的对比度从而降低了探测距离, 另外, 介质中的多次散射扩大了点扩散函数, 这使成像变得模糊。基于偏振识别的技术对减少后向散射光和提高成像质量方面正成为一项实用且非常有前景的技术^[2~4], 它依赖于目标处产生的后向散射光的偏振状态和混浊介质中光的偏振状态的差异。偏振技术已经在很多方面得到应用, 如电磁波谱技术、微波雷达以及被动红外偏振成像中都有应用。提高混浊介质中目标探测的技术还包括时间门控成像、相干检测和散射波光谱等技术, 这些技术一般比偏振技术复杂和昂贵得多。

混浊介质中的入射光在大多数情况下受到多次散射, 这一般将导致散射光的去极偏。然而在照明光束范围内入射光却受到典型的单次散射。偏振识别要求从目标散射回的未被介质多次散射的光占一定的比例, 因为多次散射后的光的偏振状态会变得任意。虽然在比较低的对比度下仍能被探测到, 但部分偏振光中都包含物体有用的偏振信息。

为了研究散射介质中目标偏振识别的有用性必须首先了解介质中目标的偏振度和光在散射介质中的传输特性。Gilbert 和 Pernicka^[3]指出利用圆偏振光技术能改善混浊湖水中的目标探测。最近的线偏振差异成像研究表明偏振成像距离是传统强度成像距离的 2~3 倍。使用基于激光的成像系统确定由于不同物体表面的解偏度而异的偏振信号, 可以获得有限物体的分类。Schmitt 等^[4]证明传输光线的偏振部分保持在光轴附近很窄的范围内, 这个范围在很大程度上依赖于微粒的大小。很多学者已经研究了混浊物质中的偏振光特性并且采用平均自由程和传输平均自由程对其进行描述^[5]。

收稿日期: 2002-04-25; 修改日期: 2002-06-03

2 原 理

散射介质中偏振识别所能探测到的最大距离不仅受物体与其周围散射体之间的偏振差别的影响, 而且还与物体、探测器之间的散射体有关。值得注意的是, 有一些光到达物体和从物体返回时只被介质做了很小程度的散射。在吸收可被忽略的介质中, 体衰减系数由散射和未被散射光的下降决定^[1]。这个衰减可以写成 $B = B_0 \exp(-n)$, 其中 B 是探测器接收到的未被散射的光, B_0 是物体在探测器方向的散射光, n 是散射平均自由程。长度为 d 的试管的平均自由程 $n = dQ_{\text{sca}}\sigma_g N$, 其中 Q_{sca} 为 Mie 散射系数, σ_g 为几何横截面, N 是粒子数量密度。光的偏振态常用 Stokes 参数表示。

$$\begin{aligned} s_0 &= E_{ox}^2 + E_{oy}^2 & s_1 &= E_{ox}^2 - E_{oy}^2 \\ s_2 &= 2E_{ox}E_{oy}\cos\phi & s_3 &= 2E_{ox}E_{oy}\sin\phi, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 E_{ox} 和 E_{oy} 分别为 x 和 y 方向的时间平均强度, ϕ 为相对相位差。

散射光的偏振状态 S' 可以用入射光的偏振状态和米勒矩阵表示, 即

$$|M|S = S'. \quad (2)$$

矩阵元素扩展后上式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中 m_{11} 为总强度, m_{22} 是共极化强度, m_{33} 是交叉极化项的强度, m_{44} 是圆偏振项。米勒矩阵中的每一个元素代表了偏振态的不同的变化, 这已经由 Bickel 和 Bailey^[8] 描述过了。作为结果 m_{33} 和 m_{44} 项通常是负的^[6,7,9]。由于后向散射中的互易性及对称性, 米勒矩阵中很多项是 0 或是相等。

3 实验装置

图一说明了试验装置中的主要组成部分。光源是工作波长为 632.8 nm 的激光器, 激光器输出光被斩波成 80Hz, 并经过 10 倍扩束镜扩束后照射在后表面, 后表面比激光束大。激光通过了一个固定的线偏振

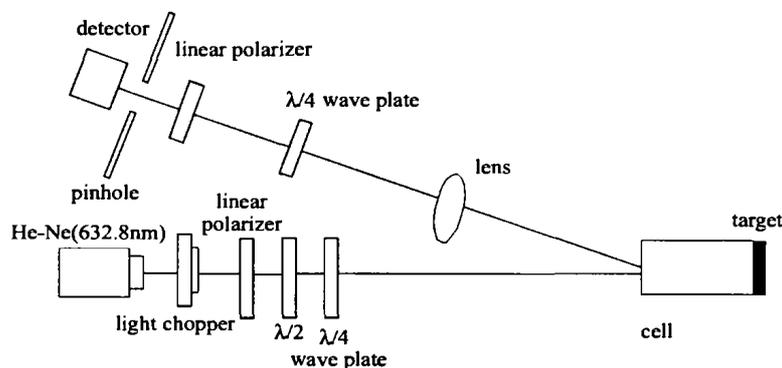


Fig.1 Experimental arrangement

器 (Glan-Thompson 型)。输入光的偏振状态由半波片和 1/4 波片调整。半波片可在旋转面上旋转, 1/4 波片被固定。这两个偏振片的组合允许线偏振和圆偏振状态的入射。接收用光电倍增管, 在光电倍增管前放置一中心波长 632.8 nm 的窄带滤光片, 窄带滤光片后还有一小孔光阑。窄带滤光片和小孔光阑的作用是减小背景光及杂散光的影响, 降低探测器输出信号中的噪音。后向散射光的偏振状态被旋转的 1/4 波片和固定的半波片分析。

采用体积为 25 mL 的试管, 用去离子水稀释单分散性聚苯乙烯乳胶颗粒 (直径 0.1 μm , 0.013 μm 标准偏差) 组成混浊介质。试管外表面有防反射层, 这样可以减少前表面向探测器方向的反射。然而, 在小的粒子浓度下内部反射呈现出散射光问题。在各种浓度下测量试管中存在和不存在着色目标时的后向散射偏振光的强度, 计算出后向散射偏振光的平均米勒矩阵。

4 实验结果

4.1 强度识别

有目标和没有目标时后向散射光的强度如图 2 所示。图 2 是强度与平均自由程 n 的函数。 n 为 0 时表示没有加粒子时的散射, 剩余的散射是由于水分子散射和试管内部散射引起的微弱散射。在没有目标存在时, 后向散射强度最初随粒子浓度的增大而迅速增长。从 $n=2$ 到 $n=5$ 强度线性增长。

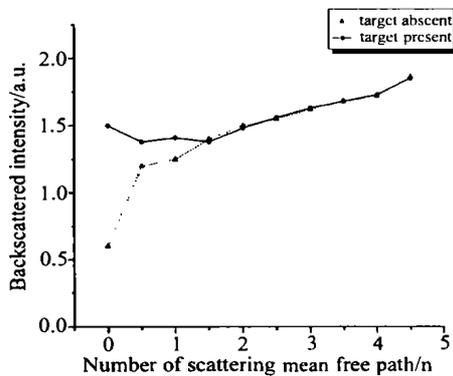


Fig.2 Backscattered intensity for the two cases of target plus particles and particles only

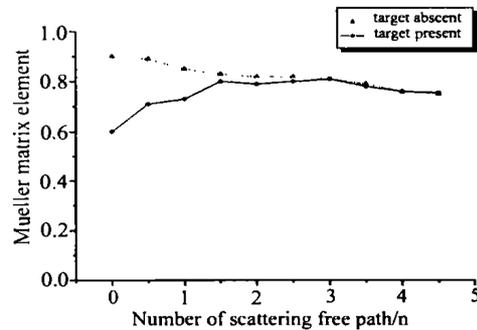


Fig.3 Variation with the number of scattering $mfp's$ of the m_{22} Müller matrix element for the two cases of target plus particles and particles only

目标在水中比在空气中呈现出更大的散射。当 n 大于 1.5 时, 两条曲线重合, 依靠传统的强度方法不能探测目标是否存在。

4.2 后向散射米勒矩阵

有目标和没有目标时所测量的米勒矩阵表明只有主对角线项是非零值并且随粒子浓度的变化而变化。刚性的各向同性物体表面的后向散射矩阵的对角线项特性已有学者进行了研究^[10]。

涂层目标在空气中和在去离子水中的米勒矩阵的比较如下所示

涂层目标在空气中的矩阵

$$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.67 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.69 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.68 \end{bmatrix}$$

涂层目标在去离子水中的矩阵

$$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.61 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & -0.60 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -0.55 \end{bmatrix}$$

在上述矩阵中 m_{11} , m_{22} 和 m_{33} 在误差允许的范围内的绝对值是相等的。两矩阵中的 m_{44} 项的变化最大。因为在有去离子水存在的情况下圆偏振态的振幅和相位能够变得没有规律, 其中相位的变化更大。当加入水后主对角线项数值的减小是由于水充当涂层的折射率匹配液体。这将减小表面反射, 它是由单次散射控制的, 所以允许更多的入射光射入涂层, 在这里, 主要是由多次散射控制的。这将导致解偏度的增加, 于是主对角线值下降。

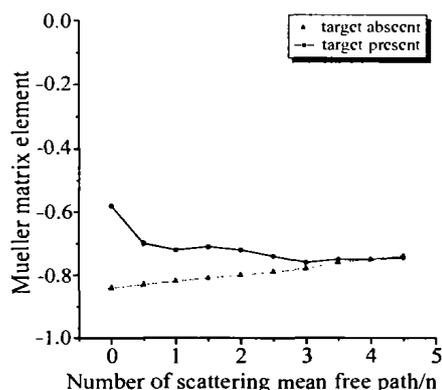


Fig.4 Variation with the number of scattering mean free paths of the m_{33} Müller matrix element for the two cases of target plus particles and particles only

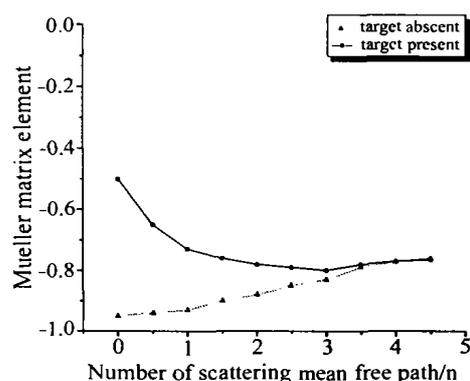


Fig.5 Variation with the number of scattering mean free paths of the m_{44} Müller matrix element for the two cases of target plus particles and particles only

本文中, 我们只考虑主对角线项 m_{22} 、 m_{33} 、 m_{44} 与粒子浓度的关系。因为这些项与偏振识别有很大的关系^[2,3]。图 3、4、5 分别表明 m_{22} 、 m_{33} 、 m_{44} 项在混浊介质中存在目标和不存在目标时的变化情况。在误差允许的情况下, m_{22} (图 3)、 m_{33} (图 4) 的绝对值是相等的。在不存在目标的情况下, 矩阵元素随 n 值的增加大致作线性增长。在没有散射体 ($n=0$) 和不存在目标时, $m_{22}=0.9$ 、 $m_{44}=-0.96$, 它们之间的差异可能是少量的双折射以及试管内壁反射造成的。这些因素随着粒子浓度的增加而变得可以忽略。

5 结 论

混浊介质中加入有涂层的目标后, 测量到的米勒矩阵在 $0 \leq n \leq 3.5$ 时有很大程度的改变, 根据目标存在和不存在时的米勒矩阵的差异, 可以判断目标是否存在。在 $n > 3.5$ 时, 目标存在与目标不存在时的米勒矩阵几乎没有差异, 所以此时在混浊介质中辨别目标存在与否是不可能的(图 3~5)。在 n 值比较小时, 我们可以看到目标存在时作用在 m_{44} 上的效果比作用在 m_{22} 上的效果明显。

参 考 文 献

- 1 Duntley S Q. Light in the sea [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1963, 53: 214-233
- 2 Chang P C Y, Walker J G, Hopcraft K I *et al.* Polarization discrimination for active imaging in scattering media [J]. *Opt. Commun.*, 1999, 159: 1-6
- 3 Gilbert G D, Pernicka J C. Improvement of underwater visibility by reduction of backscatter with a circular polarization technique [J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6: 741-746

- 4 Schmitt J M, Gandjbakhche A H, Bonner R F. Use of polarized light to discriminate short-path photons in a multiply scattering medium [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31: 6535-6546
- 5 Hielscher A H, Mourant J R, Bigio I J. Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of polarized light from tissue phantoms and biological cell suspensions [J]. *Appl. Opt.*, 1997, 36: 125-135
- 6 Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1983
- 7 Van de Hulst H. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1957
- 8 Bickel W S, Bailey W M. Stokes vectors, Müller matrices, and polarized scattered light [J]. *Am. J. Phys.*, 1985, 53: 468-478
- 9 Pezzaniti J L, Chipman R A. Müller matrix scatter polarimetry of a diamond-turned mirror [J]. *Opt. Eng.*, 1995, 34: 1593-1598
- 10 Jordan D L. Experimental measurements of optical backscattering from surfaces of roughness comparable to the wavelength and their application to radar sea scattering [J]. *Waves Random Media* 1995, 5: 41-54

Backscattering Target Detection in a Turbid Medium by Polarization Discrimination

Qiu Yinghui, Liu Jianguo, Wei Qingnong, Liu Wenqing

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031 China)

Abstract Target discrimination in a turbid medium is a practicable research topic. In this paper, we describe a method for increasing target contrast within a turbid medium by means of the polarization state of the scattered light. We present results of studies of the polarimetric backscattered light variations at 632.8 nm with and without a well-characterized painted target in a well characterized turbid medium consisting of 0.1 μm monodispersed polystyrene spherical latex scatterers. The measured Müller matrix, both with and without the target present, showed that only the major diagonal terms were significant and that they varied with particle concentration. We find that the diagonal terms of the Müller matrix measured with target and without target are different. In a turbid medium, we can determine whether the target is present or absent from the difference. Simple discrimination based on detecting the major diagonal terms of Müller matrix of backscattered light is shown to be more effective than the use of total intensity information.

Key words backscatter ; Müller matrix ; polarization

仇英辉 (1976 -), 男, 现在中国科学院安徽光学精密机械研究所攻读硕士学位。