

激光与光电子学进展

水下介质浓度对激光偏振传输特性影响的分析

贺敬航¹, 段锦^{1,2*}, 战俊彤^{2**}, 赫立群¹, 蔡立娟¹, 张肃²

¹长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 为了研究偏振光通过水体发生多次散射后偏振特性的变化,采用随机抽样拟合相函数的蒙特卡罗仿真方法进行模拟,通过模型仿真和实际实验来验证其真实性。仿真模拟了波长为 532 nm 的偏振光经过粒径满足 (600 ± 10) nm 高斯分布的聚苯乙烯小球悬浮液的偏振态变化数据,模拟过程中的光子个数为 10^6 。实验分别研究了 0° 线偏光、 45° 线偏光、左旋圆偏光以及右旋圆偏光在聚苯乙烯小球悬浮液中偏振态的变化情况。无论是仿真结果还是实验数据均表明,圆偏振光的偏振度下降幅度相比线偏振光要小 20%,即聚苯乙烯小球悬浮液粒子密度数越高,偏振光的偏振度变化波动就越大,同时就保偏性来说,圆偏光优于线偏光。在相同浓度水体中,不同起偏角度的线偏光的偏振态变化差别不大。

关键词 散射; 偏振度; 蒙特卡罗仿真; 偏振传输特性; 聚苯乙烯小球

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0529002

Analysis of Influence of Underwater Medium Concentration on Laser Polarization Transmission Characteristics

He Jinghang¹, Duan Jin^{1,2*}, Zhan Juntong^{2**}, He Liqun¹, Cai Lijuan¹, Zhang Su²

¹Electronics and Information Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²NUERC of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to study the polarization characteristics of polarized light after multiple scattering through the water body, this paper uses random sampling to fit the phase function of Monte Carlo simulation method to simulate, through model simulation and actual experiments to verify its authenticity. The simulation simulates the polarization state change data of the polarized light with the wavelength of 532 nm through the suspension of polystyrene beads whose particle size satisfies the Gaussian distribution of (600 ± 10) nm. The number of photons in the simulation process is 10^6 . In the experiment, the polarization states of 0° linear polarized light, 45° linear polarized light, left-handed circular polarized light, and right-handed circular polarized light in polystyrene pellet suspension were studied. Both the simulation results and the experimental data show that the degree of polarization decrease of circularly polarized light is at least 20% smaller than that of linearly polarized light. That is, the higher the density of polystyrene pellet suspension particles, the greater the fluctuation in the degree of polarization change, at the same time, the circular polarization is better than the linear polarization in terms of polarization preserving. In the same concentration of water, the polarization state of linearly polarized light with different polarization angles has little difference.

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2020-07-21; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61890963,61905025)、吉林省科学技术厅项目(20190103156JH)

*E-mail: duanjin@vip.sina.com; **E-mail: zhanjuntong@163.com

Key words scattering; polarization state; Monte Carlo simulation; polarization transmission characteristics; polystyrene microspheres

OCIS codes 290.4020; 290.4210; 290.5850

1 引言

近年来,针对海洋环境的水下资源开发的研究越来越受到重视,开发水下资源对我国经济发展、科技进步、国力增强有着强大的推动力。而较高水平的水下探测技术可以很好地满足资源开发的需求,同时也提出了更高的要求,随着现代水下光学技术的发展,针对水体对光影响的研究也越来越多,根据有关光在水体传输中的偏振信息研究发现,光的偏振特性广泛应用于众多领域。偏振光在水体中传输时受水体本身以及水体中粒子的影响,导致偏振光的各偏振参量改变从而使光的偏振特性在传播过程中发生变化^[1]。

由于国外对于水下偏振传输研究起步较早,所以其理论和实验都相对成熟^[2-3]。van der Laan 等^[4-5]使用偏振度(DOP)研究了不同尺寸的微球体悬浮液在很宽的波长范围内的圆形和线性偏振特性。Bicout 等^[6]进行了偏振光通过粒径为 0.48 μm 和 1.05 μm 的悬浮液的实验和仿真。国内李建立等^[7]应用 Mie 散射理论对聚苯乙烯微球的光散射特性进行了研究,得到在其他条件不变的情况下,波长越短,散射光强集中分布的角度越小,粒子直径越大,散射光强越集中分布在小角度内。Guo 等^[8]利用 Geant4 软件包模拟了激光器在不同传输长度和不同浓度溶液条件下在水下传播的偏振态,使用悬浮颗粒的海水溶液来模拟 1~10 m 传输距离的偏振态变化情况,但是海水的介质粒径很难全部掌握,使得仿真数据和实验数据很难统一。为了研究悬浮粒子对水下光通信链路和激光偏振特性的影响,Zhang 等^[9]采用 Mie 散射理论和蒙特卡罗数值模拟相结合的方法建立了水下光子的传输模型,用于分析悬浮粒子对归一化接收能量和信道延迟的影响。理论分析和模拟结果表明,当传输信道长度相同时,接收到的归一化能量和光强度将减小,并且信道时间延迟将增加,但是缺少水体介质浓度对激光偏振传输影响的分析。

本文针对上述问题采用随机抽样相函数的方法来改进蒙特卡罗仿真方法,更加真实准确地模拟了通过水体后发生多次散射偏振特性变化的偏振

光,同时以聚苯乙烯小球悬浮液为研究对象,针对不同介质浓度对不同偏振光的偏振特性影响情况进行研究,同时为之后研究偏振光的水下传输特性提供了数据支持^[10]。

2 水下偏振光传输特性仿真

2.1 水体模型

偏振是光的基本属性,为了定量研究散射介质中偏振光的传输问题,首先需要解决的问题是:描述和测量光的偏振以及偏振态的变化情况。光的偏振态的描述通常用斯托克斯向量表示法,可以定义^[11]为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x^2 + E_y^2 \\ E_x^2 - E_y^2 \\ 2E_x E_y \cos \delta \\ 2E_x E_y \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

当光与水相互作用时,其偏振状态会在一定程度上发生改变。 S 为光与水相互作用之前的斯托克斯矢量, S' 为之后的斯托克斯矢量,采用 4×4 的米勒矩阵 M 来描述 S' 和 S 之间的关系,即

$$S = MS'. \quad (2)$$

水体中的粒子近似为球形,球形粒子的单次散射矩阵可由米勒矩阵表示,即

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & -m_{34} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $m_{11} = (|s_2|^2 + |s_1|^2)$, $m_{12} = (|s_2|^2 - |s_1|^2)$, $m_{33} = (s_2^* s_1 + s_2 s_1^*)/2$, $m_{34} = (s_2^* s_1 - s_2 s_1^*)/2$; s_1 和 s_2 为散射振幅,散射粒子的尺寸和复折射率决定其数值,可以根据 Mie 理论得出。

水体的光学性质可以用下面的参数来描述:相对折射率 n (小球折射率比介质折射率), 散射系数 μ_s , 吸收系数 μ_a , 相函数 $p(\theta, \phi)$ 和单次散射的米勒矩阵 $M(\theta)$, 其中, θ 为散射角, ϕ 为方位角。模拟中为了接近真实水体情况,假设水体里存在不同粒径大小的球状物质,该模型可以由多种不同粒径的粒子组成,小球粒径可以看作是高斯分布,其中 d 为均值, Δd 为方差^[12]。对于含有 N 个不同粒径大小的水

体模型,其等效光学参数为

$$\begin{cases} u_x = \sum_{i=1}^N u_{x,i} (u_x \text{ express } u_s, u_a) \\ p(\theta, \phi) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i(\theta, \phi) u_{s,i}}{\sum_{i=1}^N u_{s,i}} \\ M(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N M_i(\theta) u_{s,i}}{\sum_{i=1}^N u_{s,i}} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 水体介质浓度的表征

为了统一仿真和实验的自变量,本文使用光学厚度来表征浓度。根据比尔定律可知,光强为 I_0 的入射光入射到介质中,光子经过介质后得到出射光强 I 。入射光强 I_0 和出射光强 I 的关系为

$$I = I_0 \exp(-\mu_c L) = I_0 \exp(-\tau), \quad (5)$$

式中: L 为介质长度; τ 为光学厚度, $\tau = \mu_c L$, 其中, μ_c 为消光系数。

$$\mu_c = \rho C_e = \rho \pi r_0^2 Q_e, \quad (6)$$

式中: ρ 为水体中介质的浓度; r_0 为粒子的半径或者非球形粒子的等体半径; πr_0^2 为粒子的吸收截面; C_e 为质量消光系数; Q_e 为消光因子。在实验过程中,聚苯乙烯小球悬浮液的浓度不容易与仿真数据对应,所以通过(5)式和(6)式用浓度 ρ 来表达光强透过率,即

$$T = I/I_0 = \exp(-\tau) = \exp(-\rho \pi r_0^2 Q_e L). \quad (7)$$

在同一种介质中,介质的粒子半径 r_0 和长度 L 不变,所以 $\pi r_0^2 Q_e L$ 也会保持不变,所以光学厚度 τ 与介质浓度 ρ 成正比。根据所得关系,在水下偏振传输实验的过程中,可以对透过率 T 进行测量,利用(7)式得到对应不同介质浓度的光学厚度 τ 。这样,在仿真水下偏振传输时,可以通过改变光学厚度 τ 来实现浓度 ρ 的变化。这样就可以利用光学厚度来表征介质浓度,把仿真实验和传输实验相互结合,让光学厚度 τ 为自变量,以光学系统的偏振传输理论为基础,研究介质浓度对偏振特性的影响,从而得到介质的偏振传输规律^[13]。

2.3 水下传输过程的蒙特卡罗仿真

使用蒙特卡罗方法来模拟粒子的传输问题,通过蒙特卡罗仿真方法把光子发射和光子传输的完整过程进行分解。光子在传输过程中需要经历初始化、采样步长并移动光子、能量吸收、散射、边界和探测处理等过程。蒙特卡罗仿真流程图如图 1 所示

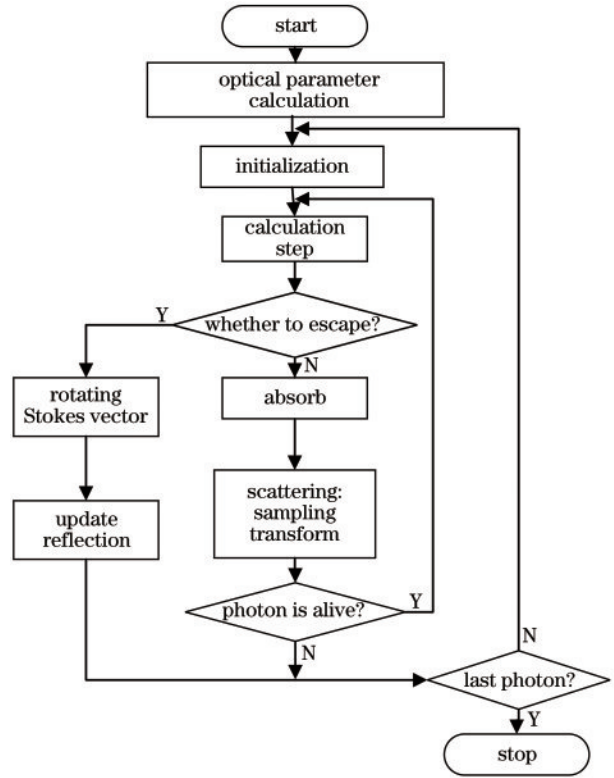


图 1 蒙特卡罗仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of Monte Carlo simulation

激光束的初始能量 w 为单位 1,在水体传输过程中,随着介质粒子的吸收而渐渐减小。用全局坐标 $(x, y, z)^T$ 来描述光子的位置,其初值为 $(0, 0, 0)^T$ 。用向量组 (e_s, e_p, e_r) 来描述光子传输中的平行振荡和垂直振荡,即向量组 (e_s, e_p, e_r) 为参考坐标系,随着光子的散射而发生改变。 s 为光子采样过程中的移动步长,表示为

$$s = \frac{-\ln(\xi)}{u_t}, \quad (8)$$

式中: ξ 为区间 $(0, 1]$ 内的随机数; u_t 为消光系数, $u_t = u_a + u_s$ 。平均自由程为 $1/u_t$,表示光子在传输过程中发生吸收和散射事件所用的平均距离^[14]。

水体中的水分子以及各种水中有机、无机物质都对光子有较强的吸收作用。用能量的部分丢失来表示光子的吸收,光子在传播过程中每行走一步这种吸收就会发生一次,光子损失的能量为

$$\Delta w = w u_a / (u_a + u_s). \quad (9)$$

光子能量更新公式为

$$w' = w - \Delta w. \quad (10)$$

本文使用随机变量 $\xi \in [0, 1]$ 得到相函数 $p(\theta)$ 分布规律的随机变量 θ 的抽样。在散射角 θ 的范围内把 $p(\theta)$ 取 m 个分割点,则 $p_i(\theta)$ 表示第 i 个分割

点,同时使分割后的各个相函数满足 $\sum_{i=1}^m p_i(\theta)=1$ 。

通过概率的基本规律得到随机变量 θ 和 ξ 相互之间的关系,要求对某一次抽样得到的处于 $[0, 1]$ 区间的均匀分布的随机数 ξ_1 , 在 $[0, \xi_1]$ 区间概率分布曲线下的面积等于归一化多分散系相函数 $[0, \theta_x]$ 区间概率分布曲线下的面积。相当于需找到 x 使得:

$$\sum_{i=1}^{x-1} p_i(\theta) < \xi_1 \leq \sum_{i=1}^x p_i(\theta) \quad (11)$$

(11)式两种极限情况对应着 x 的取值。若 ξ_1 抽样为最大值,则 θ 抽样得出 $\theta = 360^\circ$;若 ξ_1 抽样为最小值 0,则说明 $x = 1, \theta = 0^\circ$ 。在 $[0, 1]$ 区间内多次抽取均匀分布的随机数,一共抽取 P 次,这样就可以根据 P 次抽样的 ξ_1 得到与其对应的 θ_x ,将多次采样得到的散射角出现频次归一化便可以得到对应于多分散系相函数分布规律的散射相函数的抽样。

采用欧拉角方法跟踪参考坐标系 (e_s, e_p, e_r) 。具体过程如图 2 所示,先将散射前坐标系 (e_s, e_p, e_r) 绕 e_r 轴旋转方位角 ϕ ,再绕旋转之后的 e'_s 轴旋转散射角 θ ,得到散射后参考坐标系 (e'_s, e'_p, e'_r) ,两坐标系的变换公式^[15]为

$$(e'_s, e'_p, e'_r) = (e_s, e_p, e_r) \begin{pmatrix} \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ \sin \phi & \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

当光子在传输过程中遇到边界时,会发生反射

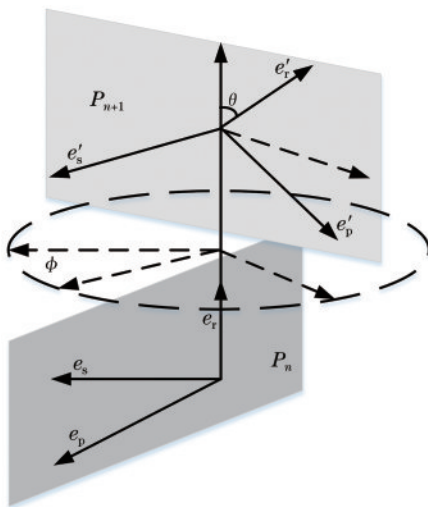


图 2 参考坐标系旋转

Fig. 2 Reference coordinate system rotation

或者透射,这时光子的参考坐标系及其偏振状态都会改变。同时在光子逃逸水体后,需要统计求和光子的斯托克斯矢量。探测器的定义是基于全局坐标系,但是光子逃逸离开水体时其斯托克斯矢量的定义是根据 (e_s, e_p, e_r) 进行统计的。因此为了使光子的斯托克斯矢量基于全局坐标系进行定义,在矢量统计求和之前,要先进行两次坐标的旋转变换。第一次旋转是为了让斯托克斯矢量重新回到子午平面。第二次旋转,参考坐标系 (e'_s, e'_p, e'_r) 绕 z 轴旋转 β 角,使平面 $e_p o e_r$ 旋转到全局坐标系 $yo z$ 平面, β 计算公式为

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(\frac{u_x}{u_y}\right), & \text{reflected} \\ \beta = \arctan\left(\frac{u_x}{u_y}\right), & \text{transmitted} \end{cases} \quad (13)$$

对多次采样得到的散射角的出现频次进行归一化处理,得到对应于多分散系相函数分布规律的散射相函数的抽样。本文随机抽样方法很好地拟合了相函数,改进的蒙特卡罗仿真方法将随机抽样方法应用到其中,再用于模拟偏振光在水下环境中的传输。

3 偏振光水下传输特性实验设计

3.1 偏振传输实验平台搭建

为了研究不同偏振光经过不同水体浓度后偏振状态的变化情况,本文用激光器和光学器件搭配产生圆偏光和线偏光,经过水槽中不同浓度介质作用后的出射光经分光系统后,由光功率计和偏振态测量仪接收出射光的能量和偏振态。532 nm 波长激光的偏振传输特性测试装置由三个部分组成:激光发射端、介质传输端、信号接收端。测试装置原理图如图 3 所示:激光发射端是北京超能元泰技术

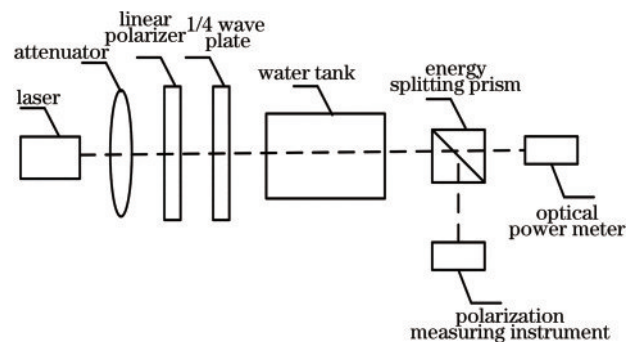


图 3 偏振传输实验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of polarization transmission experiment

有限公司生产的功率为 50 mW 的 532 nm 激光器,四川菲克科技有限公司生产的 Alluxa 衰减片,南通银兴光学有限公司生产的线偏振片,福州美扬光电有限公司生产的 1/4 波片组成,来产生线偏振光和圆偏振光。传输介质是由光学玻璃制作的水槽内不同浓度的聚苯乙烯小球悬浮液。信号接收端由美国

THORLABS 生产的能量分光棱镜将光路分为两个部分,再由美国 THORLABS 生产的数字式手持光功率计和上海昊量光电设备有限公司生产的偏振态测量仪分别测得,其中偏振态测量仪的接收范围在 400~700 nm 之间。实验装置实物图如图 4 所示,表 1 中给出了实验所需的元器件及其规格。

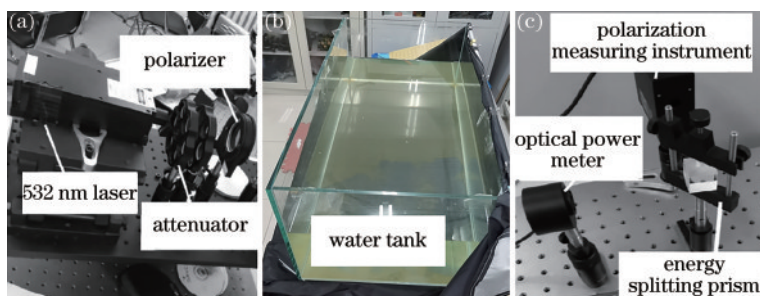


图 4 实验装置实物图。(a)激光发射端;(b)介质传输端;(c)信号接收端

Fig. 4 Physical diagram of experimental device. (a) Laser emitting end; (b) medium transmitting end; (c) signal receiving end

表 1 实验所需元器件

Table 1 Components required for experiment

Component	Parameter
532 nm laser	Power 50 mW, 1 set
Polarization state measuring instrument	Receiving range 400—700 nm, 1 set
Optical power meter	Sensor wavelength range 185 nm—25 μm, power range 100 pW to 200 W, 1 set
Energy splitting prism	T:R=50%:50%, 1 piece
Water tank	100 cm × 45 cm × 45 cm, 1 piece
Attenuator	1-9 times fixed attenuation, 1 group
Linear polarizer	400-900 nm, 20 mm clear aperture, 1 piece
1/4 wave plate	532 nm, 20 mm clear aperture, 1 piece
Computer	Processor is Intel core i7, 2 sets

3.2 水下传输过程的蒙特卡罗仿真

自然水体中含有各种成分的有机和无机胶体物质且胶体的粒子大小一般为 400~1000 nm,因为本文实验使用的是 532 nm 的激光器,同时为了很好地模拟光在水体中的 Mie 散射传输,实验使用的是粒径满足高斯分布(600±10) nm 的聚苯乙烯小球悬浮液(由麦可欣科技有限公司生产的聚苯乙烯小球悬浮液)。实验过程中激光器、衰减片、线偏振片、1/4 波片、玻璃水槽、分光棱镜、光功率计同轴依次排列,偏振态测量仪放在分光棱镜的反射方向上。去除 1/4 波片,旋转线偏振片到相应角度得到线偏振光作为出射光;放回 1/4 波片并且调整合适的角度,则得到圆偏振光作为出射光。使用 532 nm 波长的激光器,旋转偏振片得到 0°线偏振光,所以模拟中在水槽内加入粒径满足高斯分布(600±10) nm,不同浓度 8 组聚苯乙

烯小球悬浮液(8 组浓度见表 2)。使用偏振态测量仪来测得每组聚苯乙烯小球悬浮液的 DOP,每组浓度测三次,取平均值以减小测量误差,测量得到 0°线偏

表 2 聚苯乙烯小球粒子数密度与光学厚度的对应关系

Table 2 Correspondence between number density of polystyrene beads and optical thickness

Number density of polystyrene beads / (10 ⁸ cm ⁻³)	Optical thickness
0.01	0.22
0.50	0.46
1.00	0.98
1.30	1.37
1.60	1.70
10.00	1.99
50.00	2.30
100.00	2.99

振光在 8 组不同浓度的聚苯乙烯小球悬浮液的 DOP 数据。旋转线偏振片到相应角度得到 45° 线偏振光, 加入同样的 8 组不同浓度聚苯乙烯小球悬浮液, 测量得出 DOP 数据。放回 1/4 波片, 调整波片到相应角度获得左旋圆偏振光, 同上述实验操作相同, 测量得出左旋圆偏振光的 DOP 数据。继续调整波片角度得到右旋圆偏振光, 同上述实验操作相同, 测量得出右旋圆偏振光的偏振态数据。通过以上操作步骤获得不同入射偏振光在不同聚苯乙烯小球悬浮液浓度下的 DOP 数据, 制成曲线图。为了计算聚苯乙烯小球悬浮液粒子密度数和光学厚度的关系, 用光功率计测出 8 组不同聚苯乙烯小球浓度下水体的透过率。表 2 为通过(7)式计算出的对应的光学厚度。

4 实验数据分析

4.1 水下介质偏振传输仿真数据分析

水体模型为聚苯乙烯小球悬浮液, 其中小球粒径满足均值为 d , 方差为 Δd 的高斯分布。本文讨论的粒子方差 $\Delta d = 10 \text{ nm}$, 粒子粒径为 600 nm 。激光发射端的激光器波长为 532 nm , 软件模拟过程中的光子个数为 10^6 , 聚苯乙烯小球悬浮液的浓度由光学厚度表征。由计算可知, 在光学厚度达到 3 后, 偏振态数值的波动会变得缓慢即基本饱和, 所以本文仿真的光学厚度选取范围为 $0 \sim 3$, 对光学厚度进行采样的采样间隔为 0.1 , 图 5 为仿真得到的光学厚度对偏振度的影响数据。

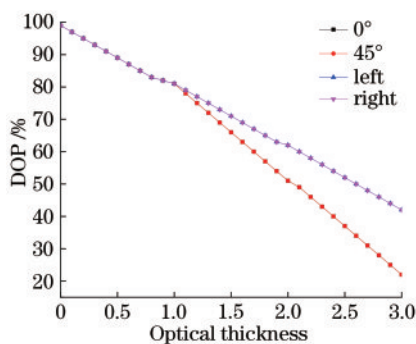


图 5 偏振度随光学厚度的增加而降低的仿真曲线
Fig. 5 Simulation curves of degree of polarization decreasing with increase of optical thickness

从图 5 可以看到, 当光学厚度增加时, DOP 不断下降。这是由于随着聚苯乙烯小球粒子数的增加, 在聚苯乙烯小球悬浮液中光子的吸收机率和散射次数不断提高, 从而减小了入射光的 DOP, 这种下降趋势是符合理论的。其中, 线偏光的 DOP 下降了

80.00%, 圆偏光的 DOP 下降了 55.00%, 圆偏光相较于线偏光来说, 下降趋势不是特别明显。这是因为介质的散射作用让线偏光在水下偏振传输过程中, 会出现内部的退偏光和表层的保偏光, 导致原本偏振态的偏振光发生改变, 成为另一种状态的偏振光。然而圆偏光是由两个相互垂直的相位差为 $\pi/2$ 的偏振光组成, 在这两个偏振方向上具有旋转对称性, 使得圆偏光在散射介质中传输时有记忆效应。相比于线偏光, 圆偏光在传输过程中实现偏振态的随机化就需要更多次的散射, 所以圆偏光的保偏性比线偏光更好。由图 5 还可以看到, 在小于 1 的光学厚度范围内, 圆偏光和线偏光的 DOP 变化基本相同, 这是因为当聚苯乙烯小球粒子数较低时, 光在介质传输中的散射次数比较少, 被吸收的概率也比较低, 就更有可能保持原有的偏振态。这样就可以解释当光学厚度较小时, 圆偏振光和线偏振光的 DOP 变化基本相同。当光学厚度在 $1 \sim 3$ 之间时, DOP 下降较快, 对比线偏光和圆偏光数据曲线可知, 线偏光比圆偏光的 DOP 下降更快; 同时 0° 和 45° 线偏振光的变化基本相同, 同时右旋和左旋圆偏振光 DOP 的变化也基本相同。由此得出结论: 相同入射状态偏振光 DOP 变化趋势基本一致。当聚苯乙烯小球粒子数较低时, DOP 下降缓慢, 随着聚苯乙烯小球粒子数的增加, DOP 数值下降迅速, 但是经过对比可知, 圆偏光的保偏性能优于线偏光。

4.2 水下介质偏振传输实验数据分析

在不同浓度聚苯乙烯小球悬浮液下进行激光水下偏振传输特性的测试, 0° 、 45° 、左旋圆偏振、右旋圆偏振四种偏振光经过 8 种不同浓度的聚苯乙烯小球悬浮液所采集到的数据为一组实验。实验中要进行三次测量, 并且对得到的三次数据取平均值, 同时根据表 2 光学厚度与聚苯乙烯小球粒子密度数的关系换算, 得出偏振度随光学厚度变化的关系曲线图, 如图 6 所示。

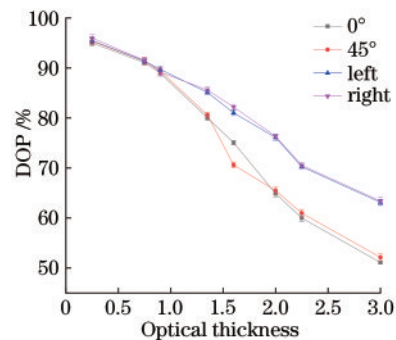


图 6 光学厚度对偏振度的影响的实验结果
Fig. 6 Experimental results of effect of optical thickness on degree of polarization

由实验结果和绘制的折线图可以得出, 0° 线偏振光的 DOP 下降了 50.12%, 45° 线偏振光的 DOP 下降了 50.37%, 左旋圆偏光的 DOP 下降了 31.15%, 右旋圆偏光的 DOP 下降了 30.95%。当入射光为 0° 和 45° 线偏振光时, 随着聚苯乙烯小球悬浮液浓度的增加, 两者的 DOP 都不断下降, 而且大体趋势一致, 基本上都下降了 50%。当入射光为圆偏光时, 随着聚苯乙烯小球悬浮液浓度的增加, 左旋圆偏光和右旋圆偏光的下降趋势大体相同, 基本上都下降了 31%, 但是圆偏光 DOP 的下降速度比线偏光的下降速度缓慢, 表现出了更好的保偏特性。

4.3 仿真和实验数据对比分析

通过 Shapiro-Wilk 检验得到仿真数据和实验数据都满足半正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 使用 Bayes 假设检验方法, 仿真和实验数据为已知, 由实验得到数据的方差 S_2 来代替 σ^2 进而得到均值 μ 的 95% 置信度的置信区间为

$$[a, b] = \left[\bar{X} - t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} + t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right], \quad (14)$$

式中: $t_{\frac{\alpha}{2}}$ 为自由度 $n-1$ 的 t 分布关于 $\alpha/2$ 的上侧分位数。

针对仿真的指标参数 θ , 给定 95% 的置信水平, 如果有统计量 $T_1 = T_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $T_2 = T_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 使下式成立, 则参数 θ 的 95% 置信区间为区间 (T_1, T_2) 。

$$p[T_1(x_1, x_2, \dots, x_n) < \theta < T_2(x_1, x_2, \dots, x_n)] = 1 - \alpha. \quad (15)$$

把实际数据得出的置信区间 $[a, b]$ 作为仿真实验的参考可接收区间, 再分析仿真数据得到的置信度 95% 的置信区间 (T_1, T_2) 与置信区间 $[a, b]$ 的重合度, 确定仿真数据对比实验数据是可信的, 这样就证明了实验数据和仿真数据满足相同的半正态分布, 即其数据是一致的。通过仿真结果与实验结果对比可以看出, 随着光学厚度的增大, 也就是介质浓度的增加, DOP 会不断下降。在聚苯乙烯小球粒子数较低时, 圆偏光和线偏光的下降趋势大体相同, 但随着聚苯乙烯小球粒子数的增加, 圆偏光的保偏性能更好, 偏振度的变化较为平缓。而线偏光的 DOP 下降较为明显, 但不同入射角的线偏光之间差别不大。从整体趋势上可以看到, 圆偏光的保偏性要优于线偏光。因为现有实验条件的限制, 实验

的采样点数不如仿真点数密集, 同时由于光在水体中传输时要经过两次光学玻璃会产生一定的损耗, 这样实验结果也会有一定的不可抗拒的误差, 所以实验所得的数据要小于仿真得到的数据, 但是数据的整体趋势相似。由此看出, 仿真结果和实验结果可以相互验证, 证明了仿真的真实性和实验的准确性。

5 结 论

本文使用仿真和实验结合的方法, 开展了聚苯乙烯小球悬浮液中激光的偏振传输特性的研究。仿真数据显示, 当光学厚度小于 1 时, 圆偏光和线偏光的 DOP 下降规律差别不大, 当光学厚度逐渐增加至 1 后, 圆偏光的保偏性比线偏光好。实验数据表明, 在聚苯乙烯小球悬浮液浓度较低时, 介质对不同起偏角的线偏光的偏振态影响不大; 当入射光分别为 0° 和 45° 线偏振光时, 对同一入射光聚苯乙烯小球悬浮液浓度越高则偏振度下降越快, 退偏现象越严重; 而在相同浓度下, 圆偏光的保偏性比线偏光好; 同时对比了不同起偏角度的线偏光偏振特性, 其差别不大, 这与仿真结果相吻合。后续将在模拟水体传输过程中针对不同粒径的聚苯乙烯小球悬浮液对激光偏振特性的影响进行研究, 为水下偏振传输的研究提供数据支持。

参 考 文 献

- [1] Savage L. Underwater imaging gets clearer [J]. Optics and Photonics News, 2013, 24(7): 30-37.
- [2] Kocak D M, Dalglish F R, Caimi F M, et al. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [J]. Marine Technology Society Journal, 2008, 42(1): 52-67.
- [3] Ramella-Roman J C, Prahla S A, Jacques S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4420-4438.
- [4] van der Laan J D, Scrymgeour D A, Kemme S A, et al. Increasing detection range and minimizing polarization mixing with circularly polarized light through scattering environments [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9099: 909908.
- [5] van der Laan J D, Wright J B, Scrymgeour D A, et al. Evolution of circular and linear polarization in scattering environments [J]. Optics Express, 2015, 23(25): 31874-31888.

- [6] Bicout D, Brosseau C, Martinez A S, et al. Depolarization of multiply scattered waves by spherical diffusers: Influence of the size parameter [J]. *Physical Review E*, 1994, 49(2): 1767-1770.
- [7] Li J L, Yuan J H, Huo B Z, et al. Characteristic analysis on Mie scattering of polystyrene microsphere [J]. *Physics Examination and Testing*, 2009, 27(3): 29-31, 36.
李建立, 袁景和, 霍丙忠, 等. 聚苯乙烯微球的 Mie 散射特性分析 [J]. *物理测试*, 2009, 27(3): 29-31, 36.
- [8] Guo B Y, Yuan G, Yu J, et al. Simulations and measurements of polarization states changing in underwater laser transmission [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 1085: 108500U.
- [9] Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P, et al. Effect of underwater suspended particles on the transmission characteristics of polarized lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(1): 61-70.
- [10] Wang Y N, Xiao M. Study on transmission characteristics of polarized light in turbid media [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 141101.
王燕妮, 校曼. 偏振光在浑浊介质中的传输特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(14): 141101.
- [11] Zhan J T, Zhang S, Fu Q, et al. Impact of the oil mist concentration degree of polarization of the laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0314006.
战俊彤, 张肃, 付强, 等. 油雾浓度对激光偏振度的影响 [J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0314006.
- [12] Ye K T, Ji' E M S, Zhai S J. Influence of particle shape on polarization characteristics of backscattering light in turbid media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0105004.
叶坤涛, 吉俄木沙, 翟盛杰. 粒子形态对浑浊介质后向散射光偏振特性的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0105004.
- [13] Zhang S, Zhan J T, Bai S K, et al. Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0729001.
张肃, 战俊彤, 白思克, 等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0729001.
- [14] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of non-spherical particles with different shapes on polarization transmission characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0629001.
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 不同形状的非球形粒子对偏振传输特性的影响 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0629001.
- [15] Ju S. Monte Carlo modeling of polarized light scattering spectroscopy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
鞠珊. 偏振散射光谱术的蒙特卡罗模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.