

烟雾浓度对偏振光传输特性的影响

张 肃¹ 战俊彤¹ 白思克² 付 强¹ 段 锦² 姜会林¹

¹ 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

² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对烟雾环境中烟雾浓度对偏振光传输特性的影响问题,采用烟煤粒子作为研究对象,分别研究了水平、垂直、+45°方向线偏振光及左旋、右旋圆偏振光经不同浓度介质传输后偏振度(DOP)的变化情况。采用蒙特卡罗方法建立仿真模型并对偏振传输理论进行分析。根据实测中浓度条件的不可控因素,采用光学厚度表征浓度,从仿真与室内实验两方面验证浓度对偏振光传输特性的影响。结果表明,偏振光入射时,偏振度随介质浓度的增加不断下降;水平、垂直、+45°线偏振光入射时,不同线偏振光偏振度随浓度的变化趋势大致相同;圆偏振光入射时,左旋、右旋圆偏振光的变化趋势基本一致;介质浓度较低时,圆偏振光偏振度随浓度的变化与线偏振光大致相同,而介质浓度较高时,圆偏振光的偏振度始终大于线偏振光,表明圆偏振光在高介质浓度、低能见度条件下具有更好的保偏能力。

关键词 散射; 传输特性; 光学厚度; 偏振光; 烟雾浓度

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0729001

Influence of Smoke Concentration on Transmission Characteristics of Polarized Light

Zhang Su¹ Zhan Juntong¹ Bai Sike² Fu Qiang¹ Duan Jin² Jiang Huilin¹

¹ *Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory,*

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² *School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,*

Changchun, Jilin 130022, China

Abstract To investigate the influence of smoke concentration on the transmission characteristics of polarized light in the smoke environment, carbonaceous particles are used as the research object to study the variation in the degree of polarization (DOP) of linear polarized light in the horizontal, vertical, +45° directions, and right- and left-hand circular polarized light after transmission in different medium concentrations. The Monte Carlo method is used to build a simulation model and analyze the polarization transmission theory. According to the uncontrollable factors for the concentration in actual measurement, the optical depth is applied as the description of the concentration, and the influence of concentration on the transmission characteristics of polarized light is verified by the simulation and the experiment. The results show that DOP of the incident polarized light decreases gradually with the increasing medium concentration. When the linear polarized light in horizontal, vertical and +45° directions is incident, the DOP variation tendency with the concentration is nearly the same as each other. DOP variation trend for the right- and left-hand circular polarized light basically coincides. DOP of the circular polarized light is close to that of the linear polarized light at low medium concentration, and is always higher than the latter at high medium concentration, which demonstrates better polarization-maintaining ability of circular polarized light under low visibility and high medium concentration.

Key words scattering; transmission characteristics; optical depth; polarized light; smoke concentration

OCIS codes 290.5855; 290.5850; 290.4020; 290.4210

收稿日期: 2016-01-15; **收到修改稿日期:** 2016-03-08

基金项目: 国家 973 计划、吉林省教育厅项目(KYC-JC-XM-2015-087)

作者简介: 张 肃(1985—),女,博士,助理研究员,主要从事偏振成像、光学信息处理等方面的研究。

E-mail: susiezhang21@126.com

1 引 言

近年来烟雾环境受到广泛关注,烟雾在军事上可以作为战场环境中的无源干扰手段,在生活中影响着人们的交通出行和健康安全。偏振作为烟雾环境下进行目标探测识别的一种有效方法,在传统成像的基础上,可反映目标的形状、材质、结构等本质特征^[1-2],在烟雾环境下普通强度成像受限时发挥着重要作用,被广泛应用于交通监管、军事作战、目标侦察等领域。

为了更有效地应用偏振探测技术,研究者们从偏振传输机理出发,研究了偏振在介质中传输特性的变化。文献[3]根据光子在介质中传输路径不同导致光子到达接收探测器的时间差异,研究了特定采样时间下偏振传输特性的变化,并从理论与实验两方面进行了验证。文献[4]从介质后向散射图样强度方面研究了介质中半径和散射系数对偏振传输特性的影响,并以球形聚苯乙烯粒子作为研究对象进行验证,从散射图样角度说明了偏振传输特性。在此基础上,文献[5]在聚苯乙烯粒子中加入牛奶、血液等微粒子,构成强散射介质,研究了半径及散射系数的变化对偏振后向散射图样的影响。这些研究中采用的介质多为液体,文献[6]以水雾和沙漠中的沙尘粒子为例,研究了红外波段下圆偏振光及线偏振光在不同尺寸粒子影响下的偏振差异。在相同探测环境下,介质浓度是环境变化最直观地反映,文献[7]以散射步长的变化表征介质浓度的变化,说明了浓度对偏振的影响,但在多数介质厚度不变的情况下并不适用。

为了更直观地描述烟雾环境下偏振传输特性的变化,研究烟雾浓度对偏振的影响,以烟雾中含量较高的烟煤粒子为研究对象,采用蒙特卡罗仿真方法^[8-9],提出了一种以光学厚度表征浓度的方法,适用于模拟介质尺寸不变时浓度对偏振的影响,并在封闭的烟雾模拟环境中定量燃烧烟煤粒子验证仿真结果,用光学厚度值描述燃烧时不易控制的烟雾浓度,实验验证浓度对偏振光传输特性的影响。

2 基于蒙特卡罗模拟的偏振传输仿真建模

图 1 为光在介质中传输过程的示意图,为了简化研究问题,重点考虑浓度对偏振传输特性的影响,将传输介质中的粒子近似为各向同性的均匀球形粒子,其中, S_0 和 S' 分别为入射光和出射光的斯托克斯矢量,平板 M 为出射光子的接收屏,光子在介质中的传输距离为 L 。

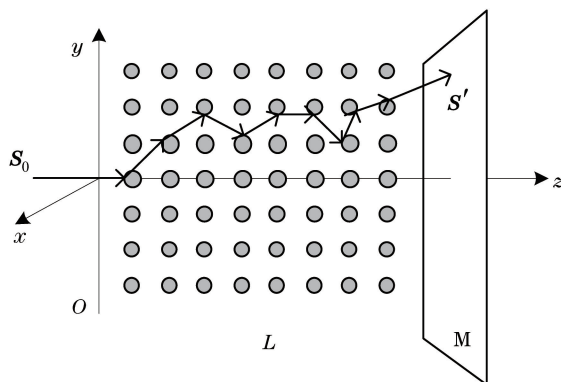


图 1 光在介质中的传输过程

Fig. 1 Transmission process of light in medium

2.1 光子在介质中的散射

光子在介质中传输时,经过粒子的多次散射,出射斯托克斯矢量 S' 与入射斯托克斯矢量 S_0 之间的关系为

$$S' = R(-\gamma_n) \cdot M(\theta_n) \cdot R(\phi_n) \cdot R(-\gamma_{n-1}) \cdot M(\theta_{n-1}) \cdot R(\phi_{n-1}) \cdot \dots \cdot R(-\gamma_1) \cdot M(\theta_1) \cdot R(\phi_1) S_0, \quad (1)$$

式中 n 为光子在介质中的散射次数, ϕ 和 γ 分别为入射光斯托克斯矢量由参考面转到散射面的角度及经散射之后又转回参考面的角度, R 为在 ϕ 和 γ 这两个角度下产生的旋转矩阵,可表示为

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & \sin 2\phi & 0 \\ 0 & -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

或

$$\mathbf{R}(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\gamma & \sin 2\gamma & 0 \\ 0 & -\sin 2\gamma & \cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

矩阵 $\mathbf{M}(\theta)$ 表示介质中球形粒子在散射角度 θ 下的 Mueller 矩阵, 由 Mie 散射可知,

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11}(\theta) & m_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ m_{12}(\theta) & m_{11}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}(\theta) & m_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -m_{34}(\theta) & m_{33}(\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $m_{11}(\theta)$ 、 $m_{12}(\theta)$ 、 $m_{33}(\theta)$ 和 $m_{34}(\theta)$ 可表示为

$$\begin{aligned} m_{11}(\theta) &= \frac{1}{2}(|S_1|^2 + |S_2|^2), & m_{12}(\theta) &= \frac{1}{2}(|S_1|^2 - |S_2|^2), \\ m_{33}(\theta) &= \frac{1}{2}(S_1 S_2^* - S_1^* S_2), & m_{34}(\theta) &= \frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2^* S_1), \end{aligned} \quad (5)$$

散射振幅函数 S_1 和 S_2 为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n(x, m) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + b_n(x, m) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{d\theta} \right] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[a_n(x, m) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{d\theta} + b_n(x, m) \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $P_n^1(\cos \theta)$ 为连带 Legendre 多项式, $P_n^1(\cos \theta) = \frac{\sin \theta}{2^n n!} \left(\frac{d}{d \cos \theta} \right)^{n+1} (\cos^2 \theta - 1)^n$, $a_n(x, m)$ 和 $b_n(x, m)$ 可表示为

$$\begin{cases} a_n(x, m) = \frac{\psi'_n(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi'_n(x)}{\psi'_n(mx)\xi_n(x) - m\psi_n(mx)\xi'_n(x)} \\ b_n(x, m) = \frac{m\psi'_n(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi'_n(x)}{m\psi'_n(mx)\xi_n(x) - \psi_n(mx)\xi'_n(x)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 m 为折射指数, 尺度函数 $x = k\alpha = 2\pi\alpha/\lambda$ 。 $\psi_n(x)$ 和 $\xi_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数, 即

$$\begin{cases} \psi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} J_{n+1/2}(x) \\ \xi_n(x) = \sqrt{\pi x/2} H_{n+1/2}^{(2)}(x) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $J_{n+1/2}$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}$ 分别为第一类 Bessel 球函数和第二类 Hankel 函数。

2.2 光子在传输介质中坐标的转换

由于粒子的散射作用, 散射前后光子坐标也会发生变化, 设散射前的光子坐标为 (x, y, z) , 散射后坐标为 (x', y', z') , 则可由光子传输的方向余弦 (μ_x, μ_y, μ_z) 和光子自由程长度 l 建立如下关系:

$$\begin{cases} x' = x + \mu_x l \\ y' = y + \mu_y l \\ z' = z + \mu_z l \end{cases}. \quad (9)$$

如图 1 所示, 光子入射初始坐标为 $(0, 0, 0)$, $yo z$ 面作为初始参考平面, 沿 z 轴方向为入射方向, 则入射初始方向余弦为 $(0, 0, 1)$ 。自由程长度为

$$l = -\frac{\ln \zeta_l}{\mu_e}, \quad (10)$$

式中 ζ_l 为(0,1)区间内均匀分布的随机数,表示光子在自由程 l 中的存活概率, μ_e 为消光系数。

(9)式中的方向余弦经散射后也会不断更新,当 $|\mu_z| < 0.9999$ 时,散射后新的方向余弦 (μ'_x, μ'_y, μ'_z) 为

$$\begin{cases} \mu'_x = \sin \alpha (\mu_x \mu_z \cos \beta - \mu_y \sin \beta) / \sqrt{1 + \mu_z^2} + \mu_x \cos \alpha \\ \mu'_y = \sin \alpha (\mu_y \mu_z \cos \beta + \mu_x \sin \beta) / \sqrt{1 + \mu_z^2} + \mu_y \cos \alpha, \\ \mu'_z = -\sin \alpha \cos \beta \sqrt{1 - \mu_z^2} + \mu_z \cos \alpha \end{cases} \quad (11)$$

当 $|\mu_z| > 0.9999$ 时,则

$$\begin{cases} \mu'_x = \sin \alpha \cos \beta \\ \mu'_y = \sin \alpha \sin \beta \\ \mu'_z = \text{sign}(\mu_z) \cos \alpha \end{cases}, \quad (12)$$

式中 sign 为符号函数。

光子经过 n 次散射后的能量权重 W_n 表示为

$$W_n = W_{n-1} \cdot \mu_s / (\mu_s + \mu_a), \quad (13)$$

式中 μ_s 和 μ_a 分别为散射系数和吸收系数。

若光子飞离边界 $z > L$ 或能量权重 W_n 小于某一阈值时,光子传输终止。

3 浓度对传输介质参数的影响

若入射到均匀介质中的光强为 I_0 ,经介质传输后,出射光强为 I ,则由比尔定律^[10]可知

$$I = I_0 \exp(-\mu_e L) = I_0 \exp(-\tau), \quad (14)$$

式中 L 为介质厚度,光学厚度 $\tau = \mu_e L$ 。在实际传输过程中,消光系数与吸收截面和吸收介质浓度有关,表示为

$$\mu_e = \rho C_e = \rho \pi r_0^2 Q_e, \quad (15)$$

式中 ρ 为吸收介质浓度,由单位体积内的粒子个数表示; πr_0^2 为粒子的吸收截面,假设粒子为均匀球形粒子,则 r_0 为粒子半径; C_e 为质量消光系数, Q_e 为由 Mie 散射计算得到的消光因子,为散射因子 Q_{sca} 与吸收因子 Q_{abs} 之和,即

$$Q_e = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{sca}}. \quad (16)$$

由(15)式可知,消光系数与介质浓度成正比,将浓度对消光系数的影响关系代入蒙特卡罗偏振传输的仿真实验中,其对偏振传输的影响主要表现在判断散射后光子能量权重、光子自由程长度及光子飞离边界的情况方面。

浓度在实际的实验环境中不易控制,可由(14)、(15)式可以确定光强透过率与浓度之间的关系,有

$$T = I/I_0 = \exp(-\tau) = \exp(-\rho \pi r_0^2 Q_e L). \quad (17)$$

在同一介质中,介质厚度 L 保持不变,(17)式中 $\pi r_0^2 Q_e L$ 为常数,则介质浓度 ρ 与光学厚度 τ 成正比。在仿真过程中,改变光学厚度 τ 值,便可实现介质浓度的变化;而在实验中,通过测量光强透过率即可求出光学厚度的变化量。因此,通过光学厚度表征浓度的变化,可以建立理论与实验之间的联系,从而验证浓度对偏振传输特性的影响。

4 偏振传输实验测试

为了验证仿真结果的正确性,在烟雾模拟环境中燃烧烟煤粒子进行偏振传输实验,实验原理如图 2 所示,激光器 1 发出的光通过衰减片 2 对光束进行衰减,之后经过偏振片 3 进行起偏,通过调节偏振片角度可产生不同的线偏振光,1/4 波片 4 用来产生圆偏振光,可根据需要随时旋入或旋出光路,起偏后的偏振光通过烟雾模拟环境 5,在 5 中燃烧烟煤粒子,并通过底部风扇系统的搅拌使烟雾环境中粒子浓度保持均匀,在出射端由偏振态测量仪 6 接收出射光,并探测其偏振态。

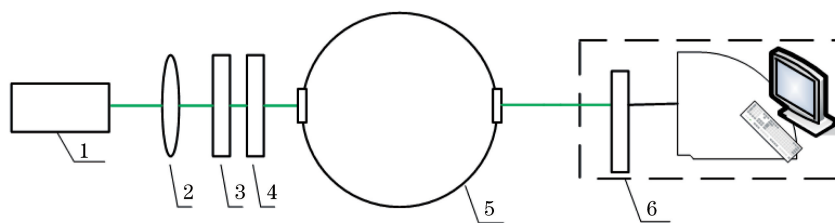


图 2 偏振传输实验原理

Fig. 2 Experimental schematic of polarization transmission

实验过程中,通过控制每次燃烧烟煤粒子的量来控制烟雾环境中介质的浓度,为了更准确地表示浓度的大小,由(17)式可知,可通过测量烟雾模拟环境中充入烟煤粒子前后的光强值得到光强透过率的大小,进而求得光学厚度在此浓度下的值。图 3 所示为光强透过率与光学厚度之间的关系曲线,二者呈指数关系。图 4 所示为实验所用的装置实物图。

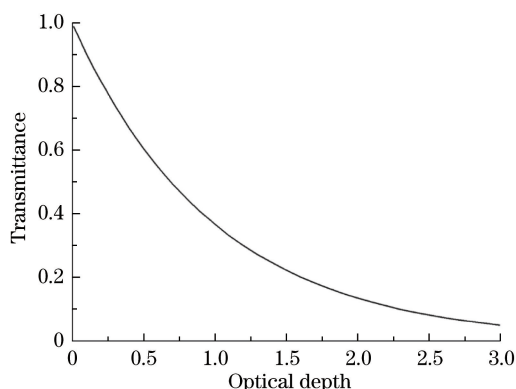


图 3 光强透过率与光学厚度之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between transmittance and optical depth



图 4 实验装置实物图。(a)烟雾环境模拟系统;(b)偏振光起偏系统;(c)偏振态接收系统

Fig. 4 Experimental setup. (a) Simulation system of smoke environment;

(b) polarization system; (c) receiving system of polarization state

5 实验结果

分别采用蒙特卡罗仿真算法和实验测试方法研究不同浓度的煤烟环境对水平方向 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]$ 、垂直方向 $[1 \ -1 \ 0 \ 0]$ 、 $+45^\circ$ 方向 $[1 \ 0 \ 1 \ 0]$ 的线偏振光及右旋圆偏振光 $[1 \ 0 \ 0 \ 1]$ 、左旋圆偏振光 $[1 \ 0 \ 0 \ -1]$ 偏振传输特性的影响。

5.1 仿真结果

在蒙特卡罗仿真中,选择可见光波长 532 nm,光子个数 10^6 个,烟煤气溶胶粒子半径 $0.37 \mu\text{m}$,折射率 $1.75+0.44i$ 。当介质厚度保持不变时,由光学厚度表征浓度的变化,二者呈正比关系。如图 3 所示,由于光学厚度大于 3 时,光强透过率小于 0.05,基本达到饱和,接收到的偏振态变化缓慢且无明显差异,所以选取光学厚度在 $0\sim 3$ 之间进行实验,每间隔 0.1 选取一个采样点,计算不同偏振态的偏振光在该采样点下传输后

偏振度的改变情况,结果如图 5 所示,其中 5 条曲线分别为水平、垂直、+45°方向的线偏振光以及右旋、左旋圆偏振光。从图中可以看到,随着光学厚度的增加,即浓度的不断增大,偏振度整体呈现下降趋势;由于水平、垂直、+45°方向的偏振光都属于线偏振光,本质上随光学厚度的变化趋势是相同的;左、右旋圆偏振光的偏振度随光学厚度的变化基本一致。当光学厚度小于 0.5(光学透过率大于 60%)时,圆偏振光偏振度的变化与线偏振光大致相同,这是由于在低浓度时,介质中发生粒子散射次数较少,保持原偏振光粒子的比例较高,线偏振光及圆偏振光的变化并无明显差异;而当光学厚度大于 0.5(光学透过率小于 60%)时,圆偏振光偏振度的下降程度明显小于线偏振光,这是由浑浊介质中的圆偏振记忆效应所导致的^[11-12],相比于线偏振光变化的随机性,圆偏振光由两个相位差为 $\pi/2$ 的垂直的偏振方向组成,偏振方向具有旋转对称性,需要更多次散射才能实现偏振态的随机化,因此在相同条件下的高浓度多次散射时,圆偏振光的退偏比线偏振光更难。这也说明高浓度浑浊介质中圆偏振光的保偏能力比线偏振光更好。

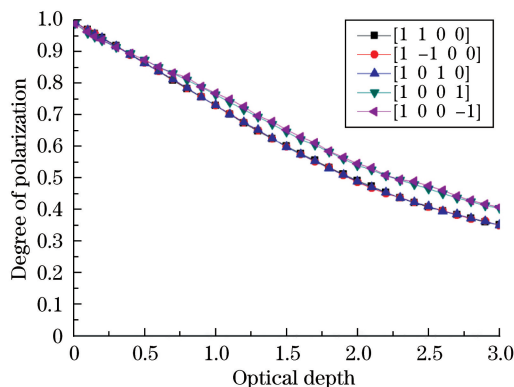


图 5 偏振度与介质光学厚度关系的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of degree of polarization at different optical depths

5.2 室内传输实验结果

为了验证仿真结果的正确性,采用烟雾模拟装置燃烧烟煤粒子进行验证,由于燃烧浓度的不可控性,提出控制烟煤燃烧时间的方法。在不同燃烧时间下,测量经烟雾介质后出射的光强值,计算光强的衰减倍率和光学厚度。测量 5 次出射光强并取平均值,计算该浓度下的光学厚度,应用光学厚度表征浓度的变化,具体数值如表 1 所示。根据表中数据,得出 7 种燃烧时间下对应的光学厚度。该方法在前期进行了大量实验验证,光学厚度计算值的平均偏差小于 0.05。

表 1 衰减倍率与光学厚度之间的数值关系

Table 1 Numerical relationship between attenuation ratio and optical depth

Intensity of incident light $I_o / \mu\text{W}$	Intensity of emergent light $I / \mu\text{W}$	Attenuation ratio $I/I_o / \%$	Optical depth τ
93	67.4	72	0.32
93	48.6	52	0.65
93	38.1	41	0.89
93	20.5	22	1.51
93	12.7	14	1.97
93	8.2	9	2.43
93	4.7	5	2.98

由于烟雾沉降等不稳定现象对实验结果存在影响,需首先研究烟煤粒子燃烧后烟雾稳定性随时间的变化,如图 6 所示,由大量实验可知,在燃烧后约 3~10 min 内烟雾是稳定的,在这段时间内进行实验测试可得到更为可靠的实验结果。实验中,为避免烟雾这一动态散射体在烟箱中轻微运动带来的影响,每组数据测量 5 次取平均值,绘制光学厚度与偏振度的关系曲线,如图 7 所示,其中实验误差小于 0.03。由实验结果可知,当入射光为圆偏振光时,随着光学厚度的增加,偏振度整体呈现下降趋势,当光学厚度小于 0.6 时,圆偏振光的偏振度略小于线偏振光,当光学厚度大于 0.6 时,圆偏振光的偏振度远大于线偏振光。当入射光为线偏振

光时,水平、垂直、 $+45^\circ$ 方向的线偏振光整体变化趋势大致相同,虽然实验已控制在烟雾相对稳定的时间内进行,但实验结果与仿真结果在细节上仍有一些差距,主要是由测量时烟雾粒子不可避免的动态作用所导致。另外,由于用控制燃烧时间的方法解决浓度的不可控性问题,光学厚度的表征受燃烧时间限制而未能连续选取,与仿真结果相比,选取的采样点仍需增加。但从整体趋势来看,实验结果表明圆偏振光在高浓度时的保偏特性优于线偏振光,验证了仿真结果的正确性。

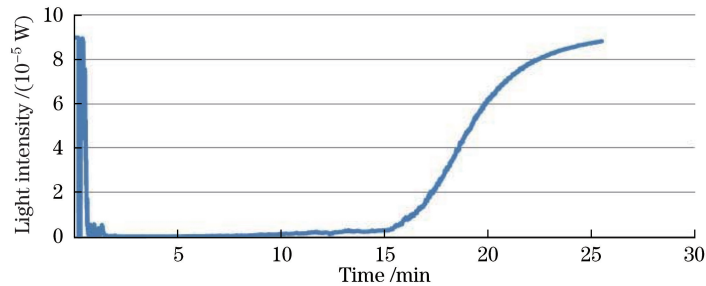


图 6 烟雾稳定性随时间的变化

Fig. 6 Variation in smoke stability with time

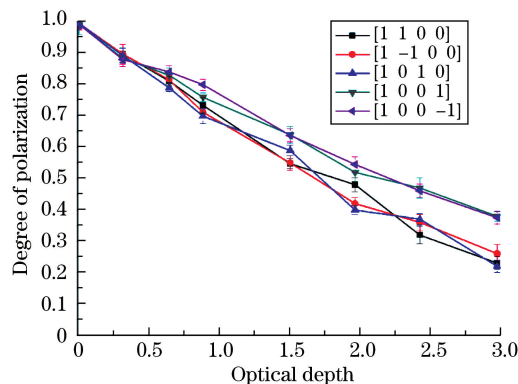


图 7 偏振度与介质光学厚度关系的实验曲线

Fig. 7 Experimental diagram of degree of polarization at different optical depths

通过仿真与实验结果可以看出,随着介质浓度的增加,介质中粒子散射次数不断增加,会导致偏振光的消偏现象,偏振度不断下降;介质浓度较低时,圆偏振光与线偏振光的下降趋势大致相同,圆偏振光的偏振度甚至低于线偏振光;随着介质浓度的不断增大,圆偏振光偏振度的减小与线偏振光相比越来越缓慢,表现出更好的保偏特性,仿真与实验结果可以相互验证。

6 结 论

烟雾环境下,针对介质浓度对偏振光传输特性的影响问题,采用蒙特卡罗方法仿真偏振传输的整个过程,并以室内烟雾模拟实验进行验证,提出了以光学厚度表征烟雾浓度的方法,使不易控制的烟雾浓度在实际实验中得以描述,从理论与实验两方面验证了结果的正确性。实验结果表明,当入射光为偏振光时,随着浓度的不断增加会产生消偏现象,且线偏振光偏振度随浓度下降的趋势大致相同。圆偏振光在低烟雾浓度(光学厚度小于0.5)时,偏振度下降趋势与线偏振光基本相同,但随着浓度的不断增加,圆偏振光的保偏特性越来越显著,使得圆偏振光入射时的偏振度始终高于线偏振光,在高浓度时展现了更好的烟雾穿透特性。

参 考 文 献

- 1 Zhang Su, Fu Qiang, Duan Jin, *et al.*. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211002.
张 肃, 付 强, 段 锦, 等. 基于提升小波的低对比度目标偏振识别技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211002.
- 2 Zhan Juntong, Fu Qiang, Zhang Su, *et al.*. Research on the effects of forward scattering angle to polarization imaging

- contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711007.
- 战俊彤, 付 强, 张 肃, 等. 前向散射角度对偏振成像对比度影响的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711007.
- 3 Wang X D, Wang L V, Sun C W, *et al.*. Polarized light propagation through scattering media: Time-resolved Monte Carlo simulation and experiments[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8(4): 608-617.
- 4 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 suspension[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 125-135.
- 5 Piederriere Y, Boulvert F, Cariou J, *et al.*. Backscattered speckle size as a function of polarization: Influence of particle-size and -concentration[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5030-5039.
- 6 van der Laan J D, Scrymgeour D A, Kemme S A, *et al.*. Detection range enhancement using circularly polarized light in scattering environments for infrared wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2266-2274.
- 7 Xu Jingyi, Gao Jun, Zhang Yangyang, *et al.*. A study on polarization properties for light scattering and transmission in different-concentration media[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(8): 1604-1609.
- 徐敬一, 高 隼, 张阳阳, 等. 光在不同浓度介质中散射传输的偏振特性分析[J]. *电子学报*, 2015, 43(8): 1604-1609.
- 8 Zhang Yong, Chen Bin, Li Dong. A three-dimensional geometric Monte Carlo method for simulation of light propagation in biological tissues[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0104003.
- 张 永, 陈 斌, 李 东. 一种模拟生物组织内光传播的三维几何蒙特卡洛方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0104003.
- 9 Yun T L, Zeng N, Li W, *et al.*. Monte Carlo simulation of polarized photon scattering in anisotropic media[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16590-16602.
- 10 Yao Lujiu, Gao Junlin, Xiao Kaitao, *et al.*. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 37-41.
- 姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 37-41.
- 11 Mackintosh F C, Zhu J X, Pine D J, *et al.*. Polarization memory of multiply scattered light[J]. *Physical Review B*, 1989, 40(13): 9342-9345.
- 12 Xu M, Alfano R R. Circular polarization memory of light[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(6): 065601.