

doi: 10. 3788/gzxb20164503. 0314006

油雾浓度对激光偏振度的影响

战俊彤¹, 张肃², 付强², 段锦³, 王欣欣³, 白思克³, 陈天威³, 姜会林²

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空地激光通信国防重点学科实验室, 长春 130022)

(3 长春理工大学 电信学院, 长春 130022)

摘 要: 基于斯托克斯矢量, 通过测量偏振度, 研究不同入射偏振态的激光分别在不同浓度油雾介质中传输后偏振特性的变化情况. 实验采用波长为 671 nm 和 532 nm 的水平、45°、-45°、90°的线偏振光, 使它们分别入射到 5 种不同浓度的油雾介质中, 计算四种偏振态偏振光的偏振度变化情况. 结果表明, 在相同油雾浓度下, 对于不同波长的激光, 波长越长, 线偏振度越高, 然而每种波长随浓度的变化趋势是一样的; 在相同波长情况下, 随着浓度的改变, 水平与垂直线偏振光的偏振度变化较大, 可达 50%, 135°与 45°线偏振光的偏振度变化较小, 约为 20%.

关键词: 散射; Stokes 矢量; 偏振度; 偏振传输; 油雾浓度

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0314006-6

Impact of the Oil Mist Concentration Degree of Polarization of the Laser

ZHAN Jun-tong¹, ZHANG Su², FU Qiang², DUAN Jin³, WANG Xin-xin³,
BAI Sike³, CHEN Tian-wei³, JIANG Hui-lin²

(1 *Opto-electronics Engineer Institute, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China*)

(2 *Space Opto-electronics technology Institute, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China*)

(3 *Electronics and Information Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China*)

Abstract: Based on the Stokes, the changes of the polarized light transmission characteristics were studied after the lasers of different incident polarizations transmit through the different concentrations of oil mist by measuring the degree of polarization respectively. Experiments were used the horizontal, 45°, 90°, -45° linear polarized lights with the wavelength of 671 nm and 532 nm to make them incident on the five kinds of different concentrations of oil mist media respectively, and computed the degree of polarization of four polarized polarization state. The results show that, at the same mist concentration and the lasers with different wavelengths, the longer wavelength, the higher the degree of polarization. But the trend of each wavelength polarization curve with the concentration is the same. Under the condition of the same wavelength and with the changing of the mist concentration, the variation of the polarization degree of the horizontal and vertical linear polarized lights is bigger which is up to 50%, the variation of the polarization degree of the 135° and 45° linear polarized lights is lesser which is about 20%.

Key words: Scattering; Stokes vector; Polarization degree; Polarization transmission; Oil mist concentration

OCIS Codes: 140.3460; 290.5855; 290.5820; 290.5850; 350.5500

基金项目: 兵器预研支撑基金(No. 62201070152)和长春市科技局基金(No. 14DR003)资助

第一作者: 战俊彤(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为激光偏振传输特性. Email: zhanjuntong@163.com

导 师: 姜会林(1945-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为空间激光通信. Email: HLJiang@cust.edu.cn

通讯作者: 张肃(1985-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为激光偏振传输特性. Email: 673895960@qq.com

收稿日期: 2015-09-08; 录用日期: 2016-03-04

0 引言

由于工业的迅猛发展,大气中的烟雾、灰霾逐年上升,在这种低对比度的环境下,利用偏振成像可以有效提高图像对比度,也可实现更远的探测距离^[1-2].但偏振光遇到灰霾、气溶胶粒子时,受到烟雾粒子的吸收散射,能量会不断地衰减,偏振光特性会在散射过程中遭到破坏^[3],所以研究偏振光传输特性的改变是十分必要的.国外针对偏振特性的研究开展较早,目前偏振相关理论与实验都已经很成熟^[11-12].美国的SY Tech公司在2000年开展了偏振光穿透烟雾的实验,目标板厚为0.5 m,烟浓度(消光系数)为 6m^{-1} .此时普通强度能见度为0.33 m,无法显现目标板图像;采用偏振成像探测,单圆偏振使得对比度最高提高2.5倍,全偏振成像使其提高4倍^[4].2006年美国密苏里大学哥伦比亚分校深入研究了在可见光波段(波长633 nm)条件下,浑浊介质的光学特性对目标偏振成像(包括线偏振成像和圆偏振成像)的影响^[5].2007年K. Arai等通过气溶胶偏振特性相关数据资料改进数学模型,改变气溶胶偏振度和敏感度分析方法,发现气溶胶偏振度对粒径大小分布以及折射率实部的敏感性的影响随散射角的变化而变化^[6].2012年2月,美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)开发基于新型圆偏振滤光镜的偏振成像技术,新的滤光片能够同时获得圆偏振和线偏振光,此项技术能够增强“穿透雾看穿战场”的能力.我国对于偏振特性研究起步晚,2009年,浙江大学开展了基于广义Stokes参量的随机电磁光束偏振态传输特性^[8]的研究.2014年,中北大学利用瑞利大气偏振分布进行太阳位置的优化计算^[14];同年大连理工大学对水云条件下大气偏振特性模拟分析^[7],国内虽然开展了浓度对偏振特性的研究,但大多处于理论和仿真建模研究阶段,缺少在真实环境中的模拟实验^[9,14-15].为了得到真实环境中的偏振光随浓度变化的传输特性,本文采用半实物烟箱进行模拟实验,利用旋转偏振片法,获取通过不同浓度的油雾介质后的偏振光斯托克斯矢量,计算了671 nm与532 nm激光器发出的水平、 45° 、 -45° 、 90° 线偏振光的偏振度,通过理论分析和实验研究,分析了油雾浓度对偏振光偏振特性改变的影响,探索偏振光在油雾介质中的散射情况以及偏振特性规律,为低对比度条件下的偏振成像探测提供了支持.

1 油雾浓度与偏振特性研究原理

1.1 光的偏振特性

偏振状态是光波携带的十分重要的信息,如果光波的电矢量与磁矢量具有相同的相位,光波就是线偏振光,如果光波的电矢量与磁矢量的相位相差 $\pi/2$ 且

振幅相等,光波为圆偏振光.两个矢量具有其他固定值的相位差就是椭圆偏振光,如果两个矢量的相位差为随机数值,就是非偏振光.

通常采用Stokes矢量来表述光波的偏振状态即 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$,也写做 $(I, Q, U, V)^T$,其中 S_0 表示总光强, S_1, S_2 为线偏振光分量, S_3 为圆偏振光分量.假设沿 z 轴方向传播的电矢量 \mathbf{E} 在垂直于传播方向的 (x, y) 平面内,以 yz 为参考平面,则电矢量的 x 分量为垂直于参考平面的分量 \mathbf{E}_\perp , \mathbf{E}_\parallel 为平行于参考平面的分量. Stokes矢量定义为

$$\begin{cases} I = \mathbf{E}_\parallel \mathbf{E}_\parallel^* + \mathbf{E}_\perp \mathbf{E}_\perp^* = A_\parallel^2 + A_\perp^2 \\ Q = \mathbf{E}_\parallel \mathbf{E}_\parallel^* - \mathbf{E}_\perp \mathbf{E}_\perp^* = A_\parallel^2 - A_\perp^2 \\ U = \mathbf{E}_\parallel \mathbf{E}_\perp^* + \mathbf{E}_\perp \mathbf{E}_\parallel^* = 2A_\parallel A_\perp \cos(S_\perp - S_\parallel) \\ V = i(\mathbf{E}_\parallel \mathbf{E}_\perp^* - \mathbf{E}_\perp \mathbf{E}_\parallel^*) = 2A_\parallel A_\perp \sin(S_\perp - S_\parallel) \end{cases} \quad (1)$$

I, Q, U, V 满足公式

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (2)$$

测出Stokes参量后,就可以求得偏振光的偏振特性,偏振度公式为^[10]

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I \quad (3)$$

线偏振光的偏振度为^[10]

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I \quad (4)$$

斯托克斯参量基本测量原理如图1.

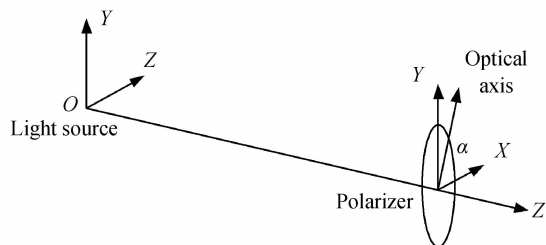


图1 斯托克斯参量测量原理

Fig. 1 Configuration of the Stokes parameters measurement
在任意 xoy 平面,在 x 轴夹角为 α 的方向上进行观测所得到得光强可以表述为

$$I(\alpha) = \langle \mathbf{E}_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle \mathbf{E}_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle \mathbf{E}_x \mathbf{E}_y \rangle \sin 2\alpha \quad \text{或} \\ I(\alpha) = (I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) / 2 \quad (5)$$

利用 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 三个角度偏振光组合来求解偏振的斯托克斯矢量,计算公式为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 \times (I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)) \\ 2/3 \times (2 \times I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ 2/\sqrt{3} \times (I(60^\circ) - I(120^\circ)) \\ I_t - I_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 浓度对Muller矩阵的影响

斯托克斯矢量与穆勒矩阵具有一定的关系,入射偏振光的斯托克斯矢量与散射介质的穆勒矩阵相乘即可到出射偏振光的斯托克斯矢量,由于油雾粒子对偏振光的散射,所以需要坐标变换,最终出射斯托克斯矢

量公式为

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\varphi) & -\sin(2\varphi) & 0 \\ 0 & \sin(2\varphi) & \cos(2\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_1 & M_2 & 0 & 0 \\ M_2 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{21} & -D_{21} \\ 0 & 0 & D_{21} & S_{21} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ Q_1 \\ U_1 \\ V_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_1 & M_2 & 0 & 0 \\ M_2 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{21} & -D_{21} \\ 0 & 0 & D_{21} & S_{21} \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 & 0 \\ F_{12} & F_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} & F_{34} \\ 0 & 0 & -F_{34} & F_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

油雾粒子的散射相函数矩阵的平均矩阵元,其表达式可写为^[10]

$$\langle F_{ij} \rangle = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r) n(r) \pi r^2 F_{ij}(r) dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r) n(r) \pi r^2 dr} \quad (9)$$

式中, $n(r)$ 为油雾粒子的对数粒子谱分布,可以表示为

$$n(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \exp \left[-\frac{(\lg r - \lg r_m)^2}{2(\lg \sigma)^2} \right] \quad (10)$$

式中, $n(r)$ 是对数粒子谱分布; N_0 是单位体积空气中气溶胶粒子的个数(个/ cm^{-3}),代表着粒子的浓度; r_m 为几何平均直径; σ 为几何标准偏差. 根据式(7)~(10)即可得出油雾浓度与斯托克斯矢量之间关系,也就能求出油雾浓度与偏振特性之间的关系.

2 实验方法及过程

2.1 实验设备

实验总体方案如图2,实物图如图3、图4,图3为油雾模拟装置,直径为2 m,高1.3 m的圆柱型密闭箱体,其四周开设有6个光学窗口分别对应 0° 、 45° 、 60° 、 90° 、 135° 、 180° 的散射角度;可根据实验需要定量模拟不同浓度的烟雾状态. 预设物理状态的油雾会从底部注入,喷升到顶部经自然沉降后可保证油雾在箱体内容积内均匀分布.

对偏振光在油雾环境下的传输特性做了实验研究,发射端对准烟雾箱的 0° 光学窗口位置,接收端对准烟雾箱 180° 光学窗口位置,以671 nm为例进行说明.

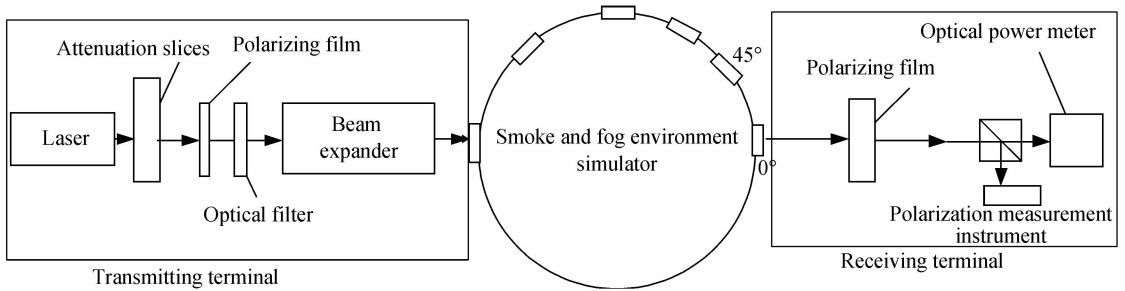


图2 实验总体方案图
Fig. 2 The plan of experiment

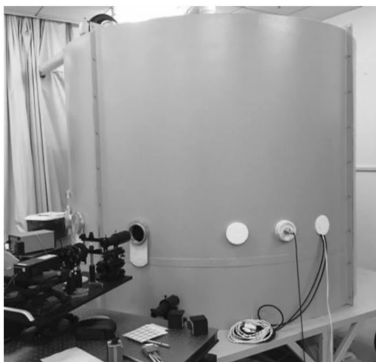
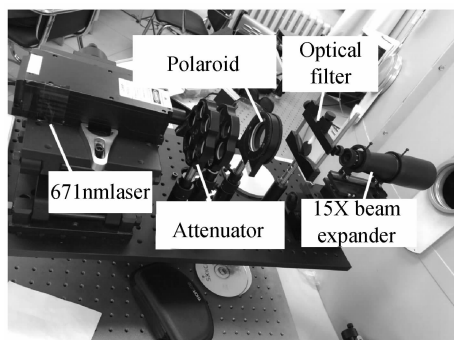


图3 油雾模拟装置
Fig. 3 Oil mist analog device

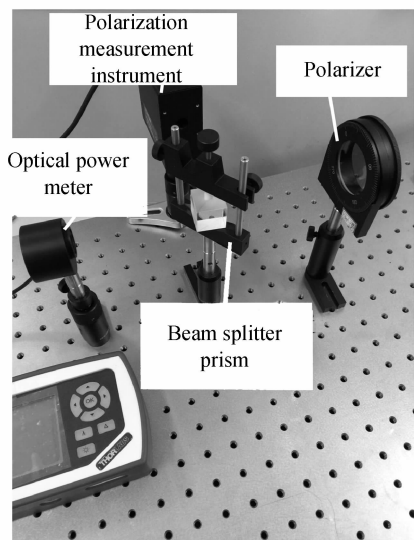
发射端装置如图4(a),由输出波长为671 nm输出功率为50 mW的固体激光器,15×倍准直扩束器,衰减片,透过光波段为400 nm~700 nm的起偏器 P_1 偏振片,1/4波片组成.

接收端装置如图4(b),由671 nm滤光片,透过光波段为400 nm~700 nm的检偏器 P_1 ,分光棱镜,偏振态测量仪,光功率计组成. 测试油雾浓度对偏振特性影响时,由671 nm激光器发出的激光经过衰减片衰减后,进入偏振片,调节偏振片角度,产生水平偏振光、 45° 线偏振光、 90° 线偏振光,分别经过烟雾箱出射再经过滤光片,到检偏片 P_2 上,经过分光棱镜在不改变偏振态的情况下,把偏振光分为能量相等的两束,一束进

入光功率计,另外一束进入偏振态测量仪,将检偏片分别调节为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 时记录其光强值记为 $I(0^\circ), I(60^\circ), I(120^\circ)$.



(a) Transmitting terminal



(b) Receiving terminal

图4 发射端与接收端实物

Fig. 4 The physical diagram of transmitting terminal and receiving end

2.2 油雾浓度标定

透过率是评价烟雾对激光衰减的指标之一,油雾中的气溶胶粒子有很强的消光特性,降低激光辐射的透过率,但是偏振光传输与普通激光传输会有不同,烟雾浓度的改变会使激光的偏振特性发生改变,因此需

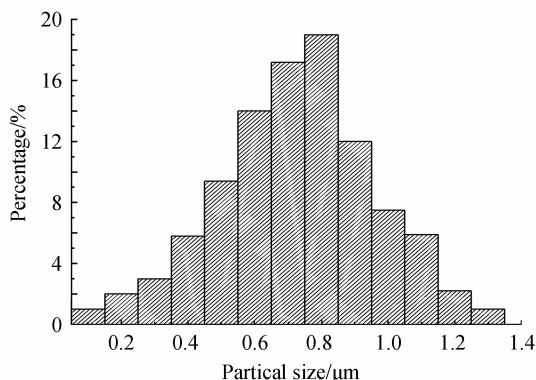


图5 油雾粒度分布

Fig. 5 The particle size of oil fog

要标定油雾浓度,本文中以不同的透过率来表征不同的烟雾浓度,实验中选取的油雾材料为甘油,油雾粒径大小通过马尔文粒度仪进行了测量,绘制曲线如图5,该油雾粒径多分布于 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$,所占比例达到了从图中可以看出粒径分布在 $0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 之间,所占比例达 50%.

标定浓度时,首先打开 671 nm 波长激光器,采用 UV-NIR 波段光密度为 1.0 与 2.0 组合的衰减片进行衰减,这个衰减倍率在试验中保持不变.从向烟箱注入油雾的那一刻起,用光功率计记录其光强的变化值,以冲入 50% 浓度烟幕 1 s 为例绘制光功率曲线,如图 6.

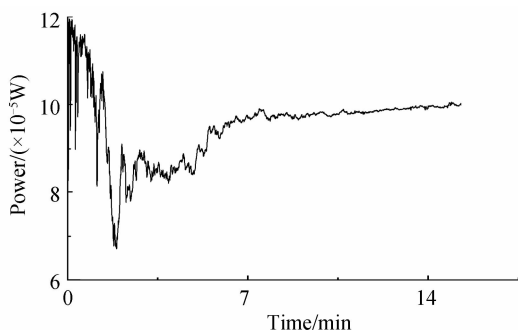


图6 光功率随时间变化曲线

Fig. 6 The changing curve of Luminous power and time

图 6 为 300 ms 采样一次,发现油雾 7 min 到 13 min 之间会保持稳定,本文选择在这个时间段内记录偏振光的光功率值,以确保实验的准确性.

本文选择在这个时间段内记录偏振光的光功率值,以确保实验的准确性.油雾发生装置每分钟可以释放 18000 立方英尺油雾,实验中设置油雾发生装置以 50% 功率工作,根据释放油雾时间的不同来控制油雾的浓度,并用衰减倍率来表征,油雾浓度用容积浓度 (%VOL) 来表示,通过测试形成衰减倍率如表 1.

表 1 油雾浓度与衰减倍率的数值对照表

Table 1 Oil mist concentration and attenuation ratio value

Oil mist concentration/(%VOL)	Output light intensity/ μW	The multiple of attenuation/dB
25.95	47.72	2.43
51.97	18.62	6.23
77.96	7.82	14.83
103.88	2.92	39.79
129.86	0.98	118

3 数据分析

首先用 671 nm 激光器发出四种不同偏振态的线偏振光入射到不同浓度的油雾后,采用 throlabs PM101D 光功率计接收的出射光强值,得到式(6)中的 $I(0^\circ), I(60^\circ), I(120^\circ)$ 进行计算,采用了多次测量求平均的方法.四种偏振态的偏振光的 $I(0^\circ), I(60^\circ), I(120^\circ)$ 都取一段时间的平均值进行计算,从而得出当

前浓度下的平均值,再根据平均值计算出当前浓度的偏振度,重复试验五次,最后确定每种浓度下的平均偏振度,同时计算出相应的偏差,标注在图6与图7中,取平均值后记录平均偏振度如表2,根据平均偏振度值与方差绘制671 nm线偏振光随浓度变化曲线如图7.

表2 波长671 nm四种线偏振光偏振度随浓度变化情况

Table 2 The change of 671 nm polarization degree with concentration

Concentration	Degree of polarization			
	45°	90°	135°	0°
1	0.82	0.38	0.77	0.99
2	0.76	0.32	0.72	0.92
3	0.68	0.29	0.71	0.88
4	0.65	0.21	0.65	0.74
5	0.64	0.19	0.6	0.62

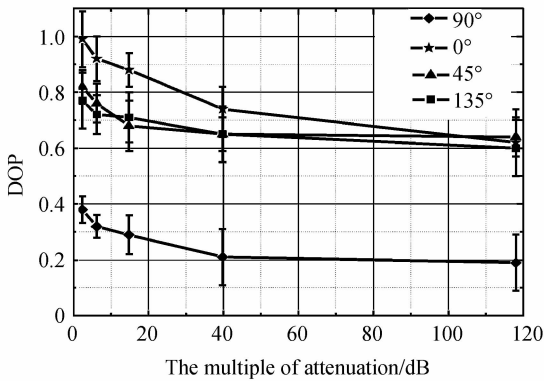


图7 四种入射偏振态671 nm经过不同浓度油雾后偏振度变化情况

Fig. 7 The relation about polarization degree and concentration of 671 nm

更换532 nm激光器,五次测量由532 nm激光器发出的四种偏振态经过不同浓度的油雾接收其三个方向(60°,0°,120°)的光强值计算出平均偏振度,见表3,根据平均偏振度值与方差绘制532 nm线偏振光随浓度变化曲线如图8.

从图7、图8两组波长测得的数据可以看出,对于不同波长,相同浓度而言,线偏振度随着波长的增加而增大,但是两种波长的变化趋势相仿,这是由于偏振光在穿过油雾时属于多次散射,而且油雾浓度越高,散射次数越多,后向散射就会增加,使偏振光发生退偏的现象,而浓度低的时候,偏振光的前向散射增加,所以偏振度就会比浓度高时要大.在相同波长条件下,水平入射的线偏振光偏振度最高,其次为45°线偏振光与135°线偏振光,90°线偏振光最低;而且对于这四种线偏振光而言,油雾浓度越大,线偏振度越小,对于水平线偏振光而言,降幅为47%;对于45°线偏振光而言,降幅约为23%;对于90°线偏振光而言,降幅为50%;对于135°线偏振光而言,降幅为23%,可见浓度对于水平与垂直线偏振光影响最大,从理论分析产生这种现象的原因是由于135°线偏振光与45°线偏振光可以分解为水平和垂直两个方向的分量,而0°与90°线偏振光只有一个方向振动,所以135°与45°线偏振光的偏振度改变量要比0°与90°的线偏振光偏振度改变量少.

表3 波长532 nm四种线偏振光偏振度随浓度变化情况

Table 3 The change of 532nm polarization degree with concentration

Concentration	Degree of polarization			
	45°	90°	135°	0°
1	0.74	0.32	0.76	0.97
2	0.73	0.30	0.72	0.89
3	0.68	0.29	0.64	0.87
4	0.62	0.25	0.59	0.77
5	0.56	0.15	0.58	0.57

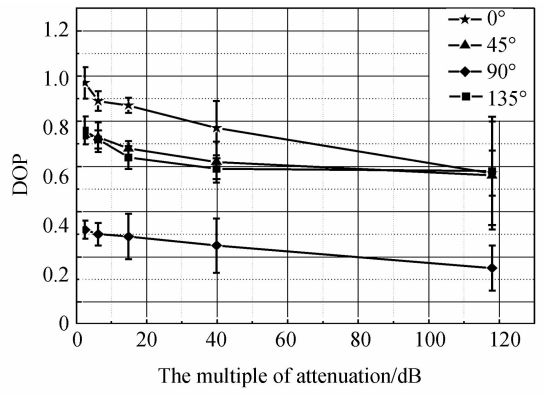


图8 四种入射偏振态532 nm经过不同浓度油雾后偏振度变化情况

Fig. 8 The relation about polarization degree and concentration of 532 nm

象,而浓度低的时候,偏振光的前向散射增加,所以偏振度就会比浓度高时要大.在相同波长条件下,水平入射的线偏振光偏振度最高,其次为45°线偏振光与135°线偏振光,90°线偏振光最低;而且对于这四种线偏振光而言,油雾浓度越大,线偏振度越小,对于水平线偏振光而言,降幅为47%;对于45°线偏振光而言,降幅约为23%;对于90°线偏振光而言,降幅为50%;对于135°线偏振光而言,降幅为23%,可见浓度对于水平与垂直线偏振光影响最大,从理论分析产生这种现象的原因是由于135°线偏振光与45°线偏振光可以分解为水平和垂直两个方向的分量,而0°与90°线偏振光只有一个方向振动,所以135°与45°线偏振光的偏振度改变量要比0°与90°的线偏振光偏振度改变量少.

4 结论

采用烟雾箱半实物模拟实验,通过旋转偏振片的方法产生532 nm与671 nm两种波长的0°、45°、90°、135°四种偏振态的线偏振光,入射到充入油雾的箱体内部,接收不同浓度油雾下的偏振光强,计算出射的偏振光的偏振度.通过实验得到以下结论:1)不同波长,相同油雾浓度,波长越长线偏振度越高,但是每种波长随浓度的变化趋势是一样的;2)相同波长情况下,135°与45°线偏振光的偏振度随浓度改变值较小,0°与90°线偏振光的偏振度随浓度的改变值较大.文中仅针对线偏振光的偏振度进行了研究,在后续工作中会增加对圆偏振光偏振度的研究.

参考文献

- [1] STRUTT J W. On the light from the sky, its polarization and color[J]. *Philosophical Magazine*, 1871, **61**(271): 107-279.
- [2] ZHANG Su, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Low contrast target polarization recognition technology based on lifting wavelet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **5**(2):02110021.
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, **5**(2):02110021.
- [3] ZHANG Qian-qian, GAO Jun, XU Xiao-hong, et al. Analysis

- of multiple scattering polarization transmission properties[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **39**(12):12130013.
- 张倩倩,高隽,徐小红,等.多粒子散射的偏振传输特性分析[J]. *中国激光*,2012,**39**(12):12130013.
- [4] CHENAULT D B, PEZZANITI J L. Polarization imaging through scattering media[C]. SPIE, 2000, **4133**(2000): 124-133.
- [5] NOTHDURFT R E, GANG Yao. Effects of turbid media optical properties on object visibility in subsurface polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5532-5541.
- [6] ARAI K, IISASA Y, LIANG X. Aerosol parameter estimation with changing observation angle of ground based polarization radiometer [J]. *Advances in Space Research*, 2007, **39**(1):28-31.
- [7] LIU Qi, CHU Jin-kui, WANG Jing, *et al.* Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition[J]. *Acta Optica Sinica*. 2014, **34**(3): 03010041.
- 刘琦,褚金奎,王兢,等.水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. *光学学报*,2014,**34**(3):03010041.
- [8] ZHU Ying-bin, DU Xin-rui, ZHAO Dao-mu. Generalized stokes parameters for polarization properties of stochastic electromagnetic beams on propagation[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, **36**(9):2331-2336.
- 朱映彬,杜新悦,赵道木.基于广义 Stokes 参量的随机电磁光束偏振态传输特性[J]. *中国激光*,2009,**36**(9):2331-2336.
- [9] HAO Zeng-zhou, GONG Fang, PAN De-lu, *et al.* Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 01010021.
- 郝增周,龚芳,潘德炉,等.沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]*光学学报*,2012,**32**(1):01010021.
- [10] 饶瑞中,等.现代大气光学[M].科学出版社,2012, 11-12.
- [11] KOCAK D M, DALGLEISH 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.
- [12] NADAV S, SHAI S, CROMIN T W. Transmission of linearly polarized light in seawater: implications for polarization signaling[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(20): 3619-3628.
- [13] WANG Fei, TANG Jun, REN Jian-bin, *et al.* Optimized calculation of solar spatial position with the rayleigh atmosphere polarization pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 12010021.
- 王飞,唐军,任建斌,等.基于 Rayleigh 大气偏振模式的太阳空间位置优化计算[J].*光子学报*,2014,**43**(12):12010021.
- [14] SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, ZHANG Ze. Modeling and simulation of space object optical scattering characteristics using TracePro[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1122003.
- 孙成明,赵飞,张泽.基于 TracePro 的空间目标光学散射特性建模与仿真[J].*光子学报*,2014,**43**(12):1122003.
- [15] WANG Hui-qin, WANG Yan-gang, CAO Ming-hua, *et al.* Impact of atmosphere visibility on laser intensity in sand and dust weather [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **42**(2): 0229001.
- 王慧琴,王彦刚,曹明华,等.沙尘天气下大气能见度对激光光强的影响[J]. *光子学报*,2014,**43**(2):0229001.