

文章编号 1004-924X(2015)03-0626-06

收发同轴脉冲激光引信在水雾中的后向散射偏振特性

陈慧敏^{1*}, 刘新阳²

- (1. 北京理工大学 机电动态控制重点实验室, 北京 100081;
2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 考虑激光引信的探测性能易受大气气溶胶的散射作用和吸收作用的影响, 本文基于 Mie 散射理论, 采用 Monte Carlo 方法模拟了脉冲激光在水雾中的后向散射偏振特性。对 1~10 μm 的 19 种粒径的水雾进行仿真, 获得了典型波长和水雾粒径下激光后向散射的平均偏振对比度。建立了收发同轴脉冲激光在水雾下的后向散射偏振特性实验系统, 通过改变超声波加湿器的浓度, 得到了 5 种典型粒径的模拟水雾粒子, 并对其进行了实验。研究表明: 当水雾粒径在 1~10 μm 时, 激光后向散射的平均偏振对比度为 0.30~0.65, 实验结果与仿真结果具有较好的一致性。得到的结果证明了激光后向散射理论模型和 Monte Carlo 仿真的正确性, 为激光引信的抗水雾干扰研究提供了理论支撑。

关键词: 激光引信; 气溶胶; 激光后向散射; 偏振; 水雾; Monte Carlo 方法

中图分类号: TJ430; TJ430+9.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0626

Backscattering polarization characteristics of pulsed laser fuze with coaxial optical system in water fog

CHEN Hui-min^{1*}, LIU Xin-yang²

- (1. *Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
 2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: laserchm@126.com*

Abstract: The performance of laser fuze is vulnerable to be scattered and absorbed by atmospheric aerosols while it propagates in atmosphere. In this work, the backscattering polarization characteristics of a pulsed laser in water fog were researched by using Mie scattering theory and Monte Carlo simulation. By simulating 19 kinds of fog particles with diameters of 1—10 μm , the Mean Contrast of Polarization (MCOP) of backscattering laser was obtained for typical wavelengths and diameters. An experimental system for the backscattering polarization characteristics of a coaxial pulsed laser was established in water fog. Five kinds of man-made fog particles with different diameters were obtained by changing the concentration of an ultrasonic humidifier. The man-made fog particles were measured experimentally, and the results show when fog particle diameters are in 1—10 μm , the MCOP of laser backscattering is from 0.30 to 0.65. Experimental results agree well with the

收稿日期: 2014-06-19; 修订日期: 2014-08-09.

基金项目: 北京理工大学机电动态控制重点实验室科研基金资助项目 (No. 9140C360202130C36129)

simulation data, thus verify the validity of laser backscattering theory model and Monte Carlo simulation, and provide a method for laser fuze anti-interference of clouds and fogs.

Key words: laser fuze; aerosol; laser backscattering; polarization; water fog; Monte Carlo method

1 引言

随着激光技术和半导体技术的发展,具备较强抗电磁干扰能力的激光引信已经广泛应用于各种炮弹、航弹、无人机、战术导弹及战略导弹中,并成为新一代先进导弹的重要标志之一。不过,激光在大气中传输时,大气气溶胶的吸收作用和散射作用会影响激光引信的探测性能。

目前,人们针对收发非同轴的非偏振激光引信开展了仿真和实验,并针对激光在云雾介质中的传输特性做了大量的理论和实验研究。王广生^[1]研究了激光引信的云雾散射特征与识别方法。宋雪平等^[2]研究了云雾对激光后向散射特性的影响,并进行了相关试验。沈娜等^[3]建立了激光光束在水雾中传输的衰减模型,计算了不同能见度下的水雾衰减系数。张京国等^[4-5]研究了激光引信收发间距和脉冲宽度对云雾回波的影响。王红霞等^[6]基于 Mie 散射理论,分别计算分析了 1.06 μm 和 10.6 μm 激光在沙尘性、水溶性、海洋性和煤烟性 4 种不同类型气溶胶中的透过率与传播距离、能见度的关系,并比较了蒙特卡罗法和单次散射的计算结果。张启兴等^[7]利用偏振技术建立了光散射实验装置,测量了两种典型火灾烟雾颗粒及超声雾化水滴颗粒的光散射矩阵元素随散射角的分布。吴笑天^[8]等基于大气成像光学模型和暗通道先验理论,采用参数自适应调整方法有效降低了大片天空、白墙等区域暗通道先验不成立时的颜色失真现象。梁善勇等^[9]利用回波强度和偏振特性表征气泡群距离、密度信息,实现了舰船尾流特别是低密度尾流的高精度探测和辨识。Jessica 等^[10-11]应用 3 种蒙特卡罗方法描述了光束在散射介质中的传输特性。Muhammad 等^[12]提出了自由空间光通信的雾衰减模型。Reza 等^[13]应用偏振度来探测目标特性。

但上述研究并未解决激光引信的探测盲区问题,本文提出了基于偏振技术的收发同轴激光引信系统,并选择纳秒级脉冲输出的微腔激光器作为激光光源,开展了典型粒径下水雾对激光的后向散射偏振特性的仿真及实验研究。收发同轴激

光引信在近距离上不存在探测盲区,同时利用偏振信息能够识别气溶胶粒子的粒径信息,更利于目标的探测与识别。

2 Mie 散射理论

雾是由悬浮在大气中微小液滴构成的气溶胶,粒子半径一般为 1~60 μm ^[3],可把雾滴近似成球形。通常,引入粒径无因次参量 $\chi=2\pi Na/\lambda$ 来表征颗粒粒径,其中 a 表示颗粒的粒径, λ 为入射光的波长, N 为颗粒周围分散介质的折射率。

根据 Mie 散射理论计算得出粒子的散射幅值为:

$$s_1 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n), \quad (1)$$

$$s_2 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n), \quad (2)$$

其中: a_n, b_n 为经过 n 次散射的 Mie 系数; π_n, τ_n 为经过 n 次散射的散射角函数,只与散射角 θ 有关。

当基准面垂直于光束传播方向时, Mueller 矩阵 $\mathbf{M}(\theta)$ 表示为^[10]:

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

式中: $m_{11} = 1/2 (|s_1|^2 + |s_2|^2)$, $m_{12} = 1/2 (|s_2|^2 - |s_1|^2)$, $m_{33} = 1/2 (s_2^* s_1 + s_2 s_1^*)$, $m_{34} = -i/2 (s_1 s_2^* - s_2 s_1^*)$ 。

球形粒子的散射可由 Mie 散射理论完全描述为 Stokes-Mueller 方程:

$$\mathbf{S} = \mu_s \mathbf{L}(-\varphi) \mathbf{M}(\theta) \mathbf{L}(\varphi) \mathbf{S}_m, \quad (4)$$

式中: \mathbf{S}_m 和 \mathbf{S} 分别是入射和散射的 Stokes 矢量, μ_s 是散射消光系数, $\mathbf{L}(\varphi)$ 是偏转矩阵, φ 是方位角。

每一次碰撞后光子的偏振状态都会发生变化,根据每次碰撞后产生的散射角和偏转方位角,可以计算得到经过 n 次碰撞后到达探测平面光子的 Stokes 矢量 \mathbf{S}_n :

$$\mathbf{S}_n = [I_n \quad Q_n \quad U_n \quad V_n]^T. \quad (5)$$

在发射光为水平偏振 P 光的前提下,用偏振对比度(Contrast of Polarization, COP)来衡量散射光的偏振程度。根据建立的实验系统, COP 为:

$$COP_n = \frac{Q_n}{I_n}. \quad (6)$$

对落入探测平面的 N 个光子的偏振对比度求均值,可得平均偏振对比度(Mean Contrast of Polarization, MCOP)为:

$$MCOP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N COP_n(i), \quad (7)$$

式中: $COP_n(i)$ 为经过 n 次碰撞后最终落入到探测平面上的光子的偏振对比度。

3 Monte Carlo 仿真

Monte Carlo 模拟的流程如图 1 所示。光子最终的输出状态有两种:一种是达到最大设定散射次数飞离边界;一种是到达探测平面并被探测器接收。

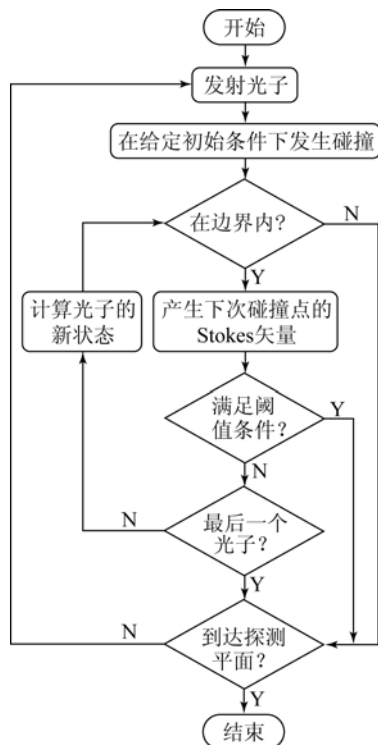


图 1 Monte Carlo 模拟的流程图

Fig. 1 Flowchart of Monte Carlo simulation

在 Monte Carlo 仿真中,采用 Henyey-Greenstein 函数^[14]来近似表示散射相位函数,如

式(8)所示:

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (8)$$

式中: g 为非对称因子,取值为 $0 \sim 1$ 。 g 越接近 1, 散射角越集中于前向。

假设激光引信处于云雾环境中,波长为 1 064 nm 的脉冲激光作为入射光,光子的初始 Stokes 矢量 S_0 为 $(1 \ 1 \ 0 \ 0)^T$, g 取 0.01。对 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的粒径进行后向散射 MCOP 的 Monte Carlo 仿真,步长为 0.5,每种粒径用 10 万个光子计算 COP 并取平均,仿真结果如图 2 所示。当雾粒径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 变化时,雾后向散射 MCOP 为 $0.30 \sim 0.65$ 。雾与人造金属目标后向散射激光的 MCOP 之间存在较大的差异,通过设定适当的阈值可以提高激光引信的抗云雾干扰能力^[15]。当雾粒径小于 $3.5 \mu\text{m}$ 时,激光后向散射的 MCOP 随着粒径的增大呈明显的下降趋势,变化幅度较大;当雾粒径大于 $3.5 \mu\text{m}$ 时,激光后向散射的 MCOP 随着粒径的变化呈现起伏状态,但整体趋势是随着粒径的增大而减小。

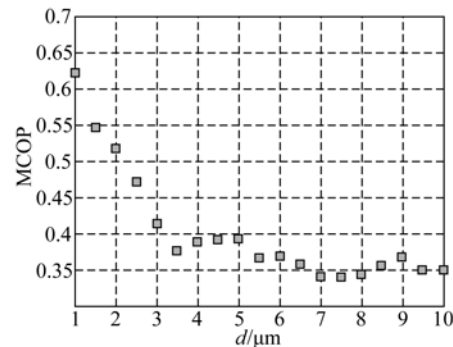


图 2 激光后向散射平均偏振对比度与雾粒径的关系

Fig. 2 Relationship between particle size and MCOP of laser backscattering

多次仿真结果表明:入射激光波长为 1 064 nm,雾粒径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 时,激光后向散射 MCOP 随着粒径的增加呈指数递减趋势。设置不同的初始条件,例如不同的非对称因子 g ,可以改变光子的散射状态,从而改变 MCOP,但 MCOP 随粒径变化的趋势不会改变。

4 实验与结果分析

激光引信光学系统如图 3 所示,其中 A 是发射光学窗口, B 是接收光学窗口, A 处光轴与 B 处光轴

之间的间距称为基线距离。根据基线距离,激光引信分为收发非同轴(基线距离不为零,收发光学系统的光轴不重合)和收发同轴(基线距离为零,收发光学系统的光轴重合),分别如图 3(a)和 3(b)所示。

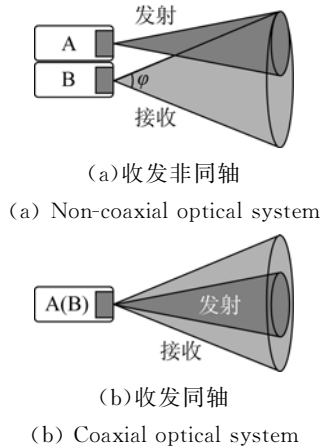


图 3 激光引信光学系统示意图

Fig. 3 Schematics of laser fuze optical systems

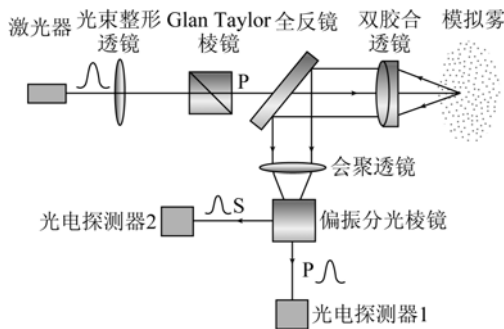


图 4 水雾后向散射偏振特性的实验原理图

Fig. 4 Backscattering polarization system with water fog

图 4 为水雾后向散射偏振特性的实验原理图。激光器采用波长为 1 064 nm、脉宽为 1.8 ns 的 Nd:YAG+Cr:YAG 微腔激光器,发射光束经过透镜整形,并通过 Glan Taylor 棱镜产生水平偏振 P 光,再经过一个直径为 25 mm、中心孔直径为 8 mm、倾斜为 45°的全反镜,P 光在孔中直接传输,经双胶合透镜探测到模拟水雾。模拟水雾的后向散射光经过双胶合透镜的整形,再通过倾斜为 45°的全反镜使光线偏转 90°后到达会聚透镜,会聚后的光束通过偏振分光棱镜产生 P 光和 S 光,其光强信息被光电探测器接收,并通过示波器显示。COP 为^[16]:

$$COP = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (9)$$

其中: I_1 和 I_2 分别为 P 光和 S 光的光强。

实验过程中模拟水雾由超声波雾化加湿器(亚都:SC-M026,康福尔:SPS-838B,新飞:168/169)产生,并且通过气溶胶粒径谱仪(GRIMM:EDM 180)进行标定,标定测量现场如图 5 所示。通过改变超声波雾化加湿器的浓度,可以改变模拟水雾的粒径,从而产生 5 种不同粒径的水雾。



图 5 模拟水雾粒径标定测量场景图

Fig. 5 Scene of water fog particle size measurement

5 种粒径水雾的激光后向散射 MCOP 的测量结果如表 1 所示。

表 1 5 种粒径水雾的 MCOP 的仿真值与实测值

Tab. 1 Simulated and experimental results of MCOP for 5 kinds of water fog particles

粒径/ μm	MCOP		相对误差/%
	仿真值	实测值	
3	0.414 3	0.442 0	6.69
4.5	0.392 3	0.402 9	2.70
6	0.368 6	0.375 8	1.95
8.5	0.356 5	0.362 7	1.74
10	0.350 1	0.351 3	0.34

实验结果表明,水雾粒子的激光后向散射 MCOP 随着粒径的增大而减小。测量值与理论值的最大误差为 6.69%(模拟水雾粒径为 3 μm)。实验和仿真的结果偏差是由于 Monte Carlo 仿真过程中初始条件和边界条件的设置,以及散射过程中水雾粒子的随机性、各种光学元件的误差及仪器测量误差等因素引起的。

5 结 论

本文以 Mie 散射理论为基础,利用 Monte Carlo 方法,通过求解 Stokes-Mueller 方程得到了粒径为 1~10 μm 的 19 种水雾的激光后向散射 MCOP 为 0.30~0.65。当水雾粒径小于 3.5 μm 时,激光后向散射 MCOP 随粒径的变化趋势明显;当水雾粒径大于 3.5 μm 时,激光后向散射的

MCOP 随着粒径的变化呈现起伏状态,但整体趋势是随着粒径的增大而减小。同时,建立了收发同轴脉冲激光的雾后向散射偏振特性实验系统,通过改变超声波加湿器的浓度,得到了 5 种典型粒径的模拟水雾粒子。粒径通过气溶胶粒径谱仪进行了标定,实验结果与仿真结果具有较好的一致性,相对误差在 6.69%之内。实验结果证明了激光后向散射理论模型和 Monte Carlo 仿真的正确性,为激光引信的抗云雾干扰研究提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 王广生. 激光引信云雾后向散射的特征与识别 [J]. 探测与控制学报, 2006, 28(6): 20-24.
WANG G SH. Characteristics and discrimination of cloud backscatter for laser fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, 28(6): 20-24. (in Chinese)
- [2] 宋雪平, 贾晓东, 覃一凡, 等. 云雾对激光后向散射特性试验研究 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 260-265.
SONG X P, JIA X D, QIN Y F, *et al.*. Experiment research on laser backscattering characteristic of fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 260-265. (in Chinese)
- [3] 沈娜, 张祥金, 郭靖. 水雾对激光引信的衰减 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 864-869.
SHEN N, ZHANG X J, GUO J. Attenuation of laser fuze through fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 864-869. (in Chinese)
- [4] 张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 激光引信收发间距对云雾回波的影响 [J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6): 1-5.
ZHANG J G, LIANG X G, LIU J X, *et al.*. Cloud and fog backscattering laser signal affected by baseline distance [J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(6): 1-5. (in Chinese)
- [5] 张京国, 梁晓庚, 刘建新, 等. 脉冲宽度对云雾回波的影响研究 [J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1421-1426.
ZHANG J G, LIANG X G, LIU J X, *et al.*. Effect of pulse width on cloud-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(12): 1421-1426. (in Chinese)
- [6] 王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(2): 024214.
WANG H X, ZHU Y ZH, TIAN T, *et al.*. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024214. (in Chinese)
- [7] 张启兴, 李耀东, 邓小玫, 等. 火灾烟雾颗粒 532 nm 光散射矩阵实验研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084216.
ZHANG Q X, LI Y D, DENG X J, *et al.*. Experimental determination of scattering matrix of fire smoke particles at 532 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 084216. (in Chinese)
- [8] 吴笑天, 鲁剑锋, 贺柏根, 等. 雾天降质图像的快速复原 [J]. 中国光学, 2013, 6(6): 892-899.
WU X T, LU J F, HE B G, *et al.*. Fast restoration of haze-degraded image [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 892-899. (in Chinese)
- [9] 梁善勇, 王江安, 宗思光, 等. 基于多重散射强度和偏振特征的舰船尾流气泡激光探测方法 [J]. 物理学报, 2013, 62(6): 060704.
LIANG SH Y, WANG J A, ZONG S G, *et al.*. Laser detection method of ship wake bubbles based on multiple scattering intensity and polarization characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 060704. (in Chinese)
- [10] JESSICA C R, SCOTT A P, STEVE L J. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 4420-4438.
- [11] JESSICA C R, SCOTT A P, STEVE L J. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part II [J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10392-10405.
- [12] MUHAMMAD I, ZABIH G, JIRI P, *et al.*. Modeling of fog and smoke attenuation in free space optical communications link under controlled laboratory conditions [J]. *Journal of Lightwave Technology*,

- 2013, 31(11): 1720-1726.
- [13] REZA S, MARIE C, JEAN Y T. Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(3): 885-892.
- [14] BINZONI T, LEUNG T S, GANDJBAKHCHÉ A H, *et al.*. The use of the Henyey-Greenstein phase function in Monte Carlo simulations in bio-medical optics [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2006, 51(17): 313-322.
- [15] 吴环宝, 贾晓东, 谢绍禹. 偏振激光引信研究 [C]. 中国宇航学会特种装备专业委员会第十五次学术交流会议论文集, 2010: 1-5.
- WU H B, JIA X D, XIE SH Y. Study on the polarization of laser fuze [C]. *Proceedings on the Fifteenth Special Equipment Professional Committee of Chinese Society of Astronautics*, 2010: 1-5.
- [16] 马斯特·波恩. 光学原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 652-653.
- BONN M. *Principle of Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 652-653. (in Chinese)

作者简介:



陈慧敏(1973—),男,河北临城人,副教授,1998年,2005年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事激光引信抗干扰的研究。E-mail: laserchm@126.com



刘新阳(1990—),女,吉林松原人,硕士研究生,2013年于山东大学获得学士学位,主要从事激光引信抗干扰的研究。E-mail: thea1104@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)