

文章编号: 0258-7025(2003)03-0219-04

雾的激光退偏振现象的实验研究

刘剑波, 蔡喜平

(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 用超声波雾化法产生了粒径分布在 5~50 μm 范围的水雾。用 He-Ne 相干光(0.63 μm) 研究了这些极小水滴的后向散射的退偏度。实验证实, 这些人造云雾的退偏度对重力有一个特别的依赖方向; 实验还发现在云雾的退偏现象中, 含有一种电-光效应。

关键词 雷达工程; 水雾; 激光雷达; 退偏振

中图分类号 O 436.3; TN 958.98 文献标识码 A

Experimental Study on the Laser Depolarization of Fog

LIU Jian-bo, CAI Xi-ping

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Fog with the size of 5~50 μm is simulated with an ultrasonic atomizer. A He-Ne laser source at 0.63 μm is used to investigate the degree of the depolarization of the backscattered wave from those tiny water drop. It is shown that the degree of depolarization characters of those man-made fog have a gravity-dependence in a specified direction, and demonstrated an opto-electronic effect in the depolarization of the fog.

Key words radar engineering; fog; laser radar; depolarization

实验证明, 利用偏振技术可以提高成像距离 1.5 倍^[1]。定量地掌握水雾对偏振激光束后向散射的影响有重要意义。在直角坐标系中, x 方向的线偏振态光子, 被粒子散射后, 散射光中存在大量的 y 方向偏振态光子, 这种现象就叫作光散射的退偏振现象。无疑, 光散射的基本过程属于量子电动力学^[2]。在唯像的电磁理论框架内, 具体处理散射问题时, 一般根据入射波波长 λ 与粒子直径 D 的比例关系, 将散射现象的研究分为三个区域: 瑞利散射区 ($\lambda \ll D$), Mie 散射区 ($0.1\lambda < D < 100\lambda$) 和巨大粒子散射区 ($D \gg \lambda$)。云雾粒子的典型直径在 1~50 μm , 而成像激光雷达的工作波长一般是 0.6 μm , 1.06 μm , 10.6 μm , 所以本文的研究属于 Mie 散射区。目前对云雾等溶胶粒子的研究大致有如下四类: 1) 将激光雷达直接作用于云雾和烟尘等大气悬浮物上, 取得后向散射光的退偏信息; 2) 用其他粒子代替水雾在实验室中进行类似物模拟研究; 3) 用

计算机进行数值模拟; 3) 从纳米材料的角度研究溶胶粒子的光散射。这四类研究, 从对激光雷达成像的影响的角度来看, 存在四点不足: 一是在自然实验中, 缺少对主要因素的控制; 二是纯化不够, 缺少直接实验; 三是没有考虑重力场对云雾光散射的影响; 四是没有考虑静电场对云雾光散射的影响。针对这些问题, 本文利用 He-Ne 激光束从实验上定量地研究了水雾后向散射的退偏现象, 力图弥补上述不足。

1 实验原理及方法

对于线偏振的入射光来说, 入射光子为平行于 y 轴的偏振态光子, 后向散射后, 却含有垂直于 y 轴的线偏振态光子。记 I_{\parallel} 为后向散射光束中 y 向偏振态光子的通量密度, I_{\perp} 为后向散射光中垂直于 y 轴的线偏振态光子的通量密度。对于单个散射体, 定义退偏振度为

收稿日期: 2001-11-02; 收到修改稿日期: 2002-01-28

作者简介: 刘剑波(1964.2—), 男, 大庆职业学院讲师, 哈尔滨工业大学应用物理系在职硕士生, 主要从事激光与光电子研究。E-mail: xpcai@hope.hit.edu.cn

$$\delta = I_{\perp} / I_{\parallel} \times 100\%$$

对于大量粒子的单次散射和多次散射, 这个定义形式仍然不变, 只不过公式中的 I_{\perp} , I_{\parallel} 是大量粒子单次散射和多次散射的光强之和。激光束穿越薄云时属于单次散射, 穿过浓雾时, 要考虑多次散射的影响。实验的关键是产生可控制粒径大小、分布均匀的微米量级的水滴。经过反复试验和筛选, 发现如下的三种办法对产生所需粒径的水滴效果稳定:

a) 用热蒸气法在 20℃ 的空气中冷凝产生半径为 1~ 5 μm 的水雾粒子。将蒸馏水加热到沸腾, 在水蒸气上升的路径中用微型风机送入冷空气(接近 0℃)。形成均匀稳定的水雾, 经 MgO 微晶涂层法测量, 水滴半径分布在 1~ 5 μm 之间, 以 2.5 μm 半径的水滴最多。

b) 用超声波雾化法(20℃)产生半径为 5~ 25 μm 的水雾粒子。自然界中的云雾, 典型半径是 10~ 20 μm, 所以在实验室产生这个范围内稳定存在的水滴尤其重要。具体原理如图 1, 超声换能器的型号是 YPT201-02。通过调节输入电压, 可以方便地调整换能器耦合给水表面的能量, 从而调节水雾的浓度。开启电源, 会在换能器的上方形成一个孤波形的突起。当电压再加大时, 这个突起的尖端会立即雾化出大量小水滴, 用微型风机将这些水滴吹出, 水滴在空气中散布成图 1 所示形状, 由于空气的饱和含水量很低(东北冬季), 大水滴很快蒸发成为小水滴。在由大滴变成小滴的过程中, 水雾被展开, 展开的水雾的不同位置平均半径不同。就这样, 采用这种重力和蒸发联合作用的方式, 分选出了所需研究的不同半径的细小水滴系列。

c) 用压缩空气雾化法(20℃)产生半径为 40~ 100 μm 的水滴。半径在这个范围内的水滴, 是要降雨之前的水滴, 经试验, 发现压缩空气法最适合产生这个范围内的水滴。用市售的喷雾器, 适当选择喷嘴的大小, 就可以产生 40~ 100 μm 半径的水滴。

用如上三种方法实验产生了 5 种不同半径的水

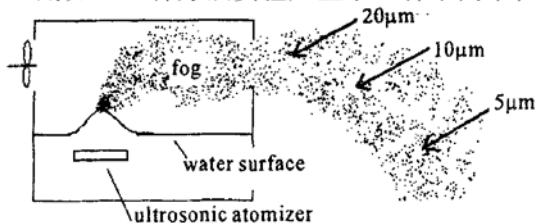


图 1 超声雾化原理

Fig. 1 Ultrasonic atomizer means

滴: 热蒸气法: $2.5 \pm 0.5 (\mu\text{m})$, 超声雾化法: $4.5 \pm 1.2 (\mu\text{m})$, $9.1 \pm 1.8 (\mu\text{m})$, $14.8 \pm 2.4 (\mu\text{m})$, 压缩空气法: $37.8 \pm 6.8 (\mu\text{m})$ 。

1.1 水滴半径的测量

这些悬浮于空气中的极小水滴的测量必须用气象学中的标准方法——MgO 微晶涂层碰撞法。这种碰撞法的原理是将涂有 MgO 微晶涂层的显微镜载玻片的一面以一个合适的速度去撞击水滴粒子, 水滴撞击到 MgO 涂层上, 将涂层压出一个凹形的水滴痕迹。打入涂层的水滴立即被 MgO 吸收, 形成一个凹形硬壳, 这些凹痕可以永久保存和测量。上面的 5 种数据就是通过这种办法采集和修正后得到的。5 种数据的百分比误差都在 20% 以内, 代表了所产生水滴大小的分散程度。可以认为, 以上介绍的 3 种水的雾化方法成功地产生了不同半径范围的小水滴。

1.2 水雾粒子退偏振度的测量

将线偏振的 He-Ne 激光束直接照射在水雾粒子上。在后向散射方向上测量后向散射的光电流。比较后向散射光中 x 方向偏振和 y 方向偏振的光电流, 就测出了相应半径粒子的退偏度。实验装置如图 2 所示。⊙号表示图 2 是俯视图, 重力 g 方向垂直于纸面向里, He-Ne 激光器的功率为 8 mW, 光电池直接连接光电检流计, A 是起偏器, B 是检偏器。图 3 是起偏器 A 和检偏器 B 的布置方式。激光束入射方向垂直于纸面向里, 垂直方向是重力方向, 用 g 代表 y 轴的方向是入射的线偏振光束的起偏方向, y 轴与 g 可成 α 角, 称为起偏角。当用光电池测量后向散射光中与入射光子相同偏振态的散射光子时, 线检偏器 B 的透光方向取 y 方向, 与起偏器 A 的起偏方向相同, 测得的光电流记为 i_{\parallel} 。当测量后向散射光中与入射光子偏振态垂直的散射光子时, 线检偏器 B 的透光方向取 x 方向, 与起偏器 A 的起偏方向垂直, 测得的光电流记为 i_{\perp} 。则退偏度就定义为 $\delta = i_{\perp} / i_{\parallel}$ 。接下来的实验将发现 $\delta = i_{\perp}$

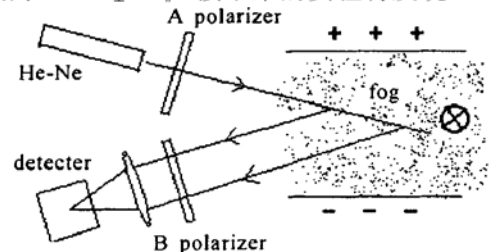


图 2 研究雾退偏振效应的实验装置

Fig. 2 Experiment setup for the depolarization effect of fog

i_{\parallel} 与起偏角 α 有明显的函数关系, 有理由猜测, δ 有可能与水滴大小、变形程度、静电场的影响、在重力场中的随机取向有关。

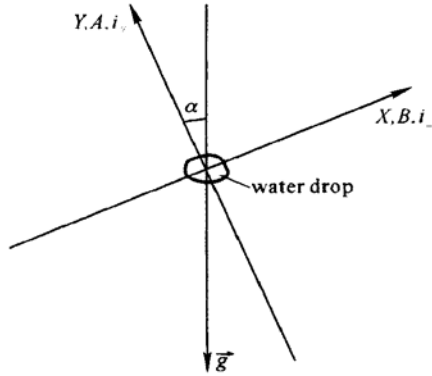


图 3 起偏器和检偏器的放置方式
Fig. 3 Arrangement of the two polarizer

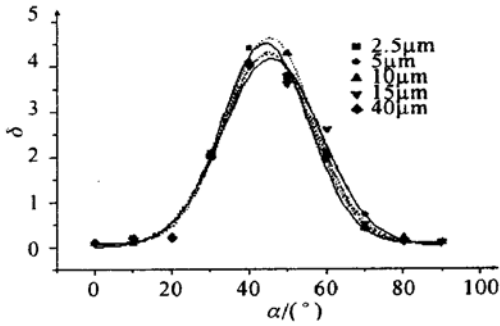


图 4 5 种半径水滴的 δ_a 与起偏角 α 的关系
Fig. 4 Relationship between the degree of depolarization and the polarization angle for different water drop a radius

实验中测量了平均半径分别为 $2.5 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$ 5 种纯水产生的水滴的退偏度 δ 。实验结果处理后绘成图 4。

1.3 静电场对水雾退偏振现象的影响

自然界的云雾中总伴有静电场的存在。为了探索静电场对水雾退偏振现象的影响, 在实验装置的水平方向加上高压静电, 如图 2 所示。此时, 静电场方向、光束入射方向和重力方向三者互相垂直, 静电场场强 $E = 1000 \text{ V/cm}$ 。实验发现, 静电场对水滴的退偏度(单次散射)有明显影响, 以半径 $r = 10 \mu\text{m}$ 水滴为例, 数据处理后, 其结果如图 5 所示。

1.4 多次散射的退偏度

以上都是薄云的实验结果, 即属于单次散射。而多次散射则对应于浓云的情况。由于超声波雾化器可以通过调节输入电压控制单位时间的雾化量, 所以, 可以产生不同浓度的水雾, 从而较精确地测量不同浓度的水云的退偏振效应。实验中用分析天平

精确测出雾化器单位时间内雾化的水量, 将雾化的水滴限制在一个小体积内, 则这个体积的水滴浓度就正比于单位时间的雾化量, 利用这样的“云室”来研究水雾浓度对退偏振的影响。由于 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ 具有特别的意义, 所以, 实验取这两个偏振方向为代表, 实验结果如图 6, 它表示由单次散射向多次散射过渡过程中退偏度的变化趋势。

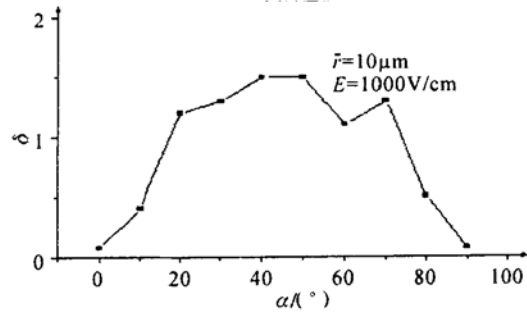


图 5 1000 V/cm 的静电场对水滴后向散射的影响
Fig. 5 Effect of electrostatic field with the strength of 1000 V/cm on the backscatter character

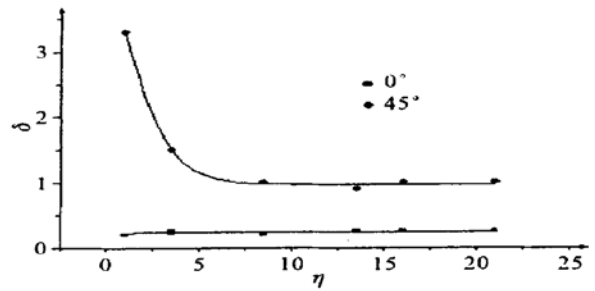


图 6 不同相对浓度 η 的水雾对退偏度的影响
Fig. 6 Effect of fog density on the degree of depolarization

2 实验结果分析

由于实验中水雾飘忽不定, 导致测得的光电流离散性很大, 采用绝对误差法处理数据, 结果是百分比误差为 15%。这样大的百分比误差, 导致下面的讨论只能是定性的。即使如此, 由实验数据绘制的实验曲线也极明确地显示了退偏度与起偏角(图 4)、电场强度(图 5)、水雾浓度(图 6)的依赖关系。

图 4 是将大量离散的、无规律实验数据, 按退偏度 δ 与起偏角 α 的关系整理后发现的有规律的分布。这个分布即使有 15% 的误差, 也明确地揭示出退偏度 δ 与重力场的关系。当起偏角在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 和 $70^\circ \sim 90^\circ$ 之间时, δ 很小, 在 0.5 以内; 在 20° 之后 δ 增加很快, 并在 45° 处达到最大值, 在 60° 之后又迅速下降。整个退偏曲线呈单峰性, 对称性, 最小值约

为 0.2, 最大值约为 4。图 4 中曲线是用高斯分布拟合的。对应的是薄雾的情形, 属于单次散射。

图 4 明显地揭示出退偏振现象对重力方向的依赖性。如果假设重力场中下落的水滴成扁球形状, 并且短轴方向沿着重力方向, 则可以定性说明图 4 的实验结果。第一, 水滴呈扁椭球形的假设与流体力学的已有观察相一致; 第二, Mie 关于各向同性的球形粒子的散射解析解中, 后向散射的退偏度为零, 并且微波实验已经证实了 Mie 氏理论的正确性, 所以, 水珠的后向散射, 在起偏角 45° 处呈极大的退偏度是 Mie 氏解释不包含的; 第三, 虽然 Mie 氏散射区关于椭球粒子的退偏振现象没有解析表达式, 但可以借用已有解析结果的瑞利散射区椭球状粒子的退偏特性来解释其退偏特性呈单峰性。第四, 文献中经常讨论的非球形粒子的 Mie 散射的数值模拟结果也显示, 非球形粒子的 Mie 散射在后向方向的退偏度不为零。上面这四条都支持这样的定性解释: 在重力、表面张力和空气的斯托克斯阻力的联合作用下, 所有微米量级的水滴呈扁椭球形, 并在短轴方向与重力方向一致。这样的形状和取向导致了后向散射的退偏曲线在 45° 附近呈现明显的单峰性。

图 4 中, $\alpha = 0^\circ$ 处, $\delta = 0.25$ 。这说明水滴中被入射光的电场策动的众多电偶极子是一些各向异性振子。它们不能自由地完全跟随策动电场的方向。退偏度 δ 的开方, 即 $\delta^{1/2} = E_{\perp} / E_{\parallel} = \sqrt{0.25} = 0.5$, 代表了水滴中联合行动的众多电偶极子的各向异性的程度。这个退偏度不是水滴偏离球形产生的。

在薄雾情况下, $\alpha = 45^\circ$ 时, $\delta = 4$, 明显高于文献[3]中给出的 0.3~0.6, 由定义 $\delta = |E_{\perp} / E_{\parallel}|^2 = 4$ 得 $|E_{\perp} / E_{\parallel}| = 2$ 。这说明在 Mie 散射区, 在 y 轴方向策动的电场激发了 x 轴方向的偶极子 P_{\perp} , 并且 $P_{\perp} = 2P_{\parallel}$, P_{\parallel} 是 y 轴偏振的光场激发的 y 轴方向的偶极矩(当然, 这里 P_{\perp} , P_{\parallel} 都是产生后向散射光的偶极矩), 这是 Mie 氏散射的出人意料的现象。

在水雾的两侧水平方向加上静电场后, 测得了退偏光电流数据, 经处理后绘成图 5。图 5 与不加静电场的图 4 相比有明显的共性和差异, 共性是 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ 附近 δ 都较小, 但不为零。差异的地方也很明显, 加上静电场后, 图 4 的单峰性失去, 压缩成一个平台, 退偏度的最高值由 4 左右压缩到 1 左右。但对称性仍保持着。从图 4 和图 5 的比较中看出, 加上静电场后 δ 上升很快, 在 20° 以后上升到大于 1 的数值, 并保持在一个高的水平上, 即退偏度在 $\alpha = 20^\circ$ 以后, 进入饱和区。这表明了水雾的退偏度

与外加静电场有明显的依赖关系。由于这种现象是静电引起的, 也可称作是一种“电-光效应”。

将多次散射退偏实验的数据处理后, 用玻尔兹曼分布拟合, 绘成图 6。由于人造水雾的浓度增加时, 雾的瑞流性消失, 检流计的光标停留在很大的冲掷角上。这时的误差, 按最坏的情况考虑, 在 5% 以内。这比图 4, 图 5 的数据可靠得多。多次散射过程不能使用 Mie 氏理论, 由一个水滴散射的光又辐照在其附近的水滴上, 引起二次散射, 二次散射的光又引起三次散射, 如此下去形成多次散射。实验中接收口径 8 cm, 距散射体 3 m。接收到的光完全可以认为是后向散射。从图 6 中明显地看出由单次散射向多次散射过渡过程中退偏度的变化趋势。重力对退偏振的影响依然存在, 在起偏角 $\alpha = 0^\circ$ 的情况下, 随着水雾浓度的增加, δ 上升, 并趋近于 0.25; 对于 $\alpha = 45^\circ$, δ 由 3 下降到 1, 并保持在 1。也就是说, 对于浓雾, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 后向散射光中有 25% 是退偏了的, $\alpha = 45^\circ$ 时, 后向散射光中, 有一半是退偏振的, 可见 $\alpha = 45^\circ$ 时的后向散射, 完全变成了自然光。

3 结 论

1) Mie 氏散射区, 非球体是水雾粒子产生退偏振的主要原因; 2) 形变的雾粒子在空间不是随机取向的, 而是沿重力方向有一个优势取向; 这样 α 在 45° 方向可以远大于 1, 在 0° 方向可以远小于 1。这是个重力效应; 3) α 在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 区间, $\delta = 0.25$, 这主要是由水滴中联合偶极子是各向异性引起的, $\delta = 0.25$ 表征了这种各向异性的程度, 在 $20^\circ \sim 45^\circ$ 区间, 重力效应(即重力变形)对退偏振度贡献最大; 4) 经过实验, 观察到了水雾也具有电-光效应。机理可能是静电场使水滴变形和 Stark 效应。这一效应可能有利于将激光雷达的应用范围推广到大气的电场分布的研究领域; 5) $\alpha < 10^\circ$ 范围内, δ 很小, 采用偏振技术的成像激光雷达的起偏方向, 应该采取铅直的方向。这样可以提高探测距离和图像对比度。

参 考 文 献

- 1 W. Liu, N. Cao. Image enhancement by polarizing discrimination in turbid media [J]. *Chinese J. Quantum Electron.* (量子电子学报), 1997, **14**(6): 520~526 (in Chinese)
- 2 Ka Xing Lin. *Advanced Quantum Mechanics* [M]. Beijing: High Education Press, 2000. 600~617
- 3 Abraham Gross, Madison J. Post, F. F. Hall, Jr.. Depolarization, backscatter and attenuation of CO₂ lidar by cirrus clouds [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2518~2522