

# 一种分析雾中成像的新方法\*

隋成华 徐志君

(浙江工业大学技术物理研究所 杭州 310014)

**提要** 从理论上分析了载有物像信息的子弹光在烟雾介质中传播时强度的变化及极限传输距离, 提出了一种基于光偏振特性验证该理论的新实验方法, 其实验结果与理论分析一致, 并讨论了利用该实验装置在实际雾中成像场合下改善信噪比、提高成像质量的可能性。

**关键词** 雾中成像, 子弹光, 高噪光

## 1 引言

高噪光背景下物像提取的研究可利用辐射传输理论<sup>[1]</sup>和多次散射理论<sup>[2]</sup>进行分析。本文基于光的粒子性, 即将光在烟雾介质中的传输行为简化为光子与介质中的分子或粒子发生相互作用的过程, 并将那些与介质中的分子或粒子发生相互作用(碰撞和吸收)而改变其原有状态(传输方向和偏振方向)的光子, 称为蛇形光; 而有些光子不与介质中的分子或粒子发生相互作用, 在传输过程中不改变状态, 这些光子称为子弹光, 它载有最初的物像信息。由于光的散射和吸收, 特别是介质散射形成蛇形光淹没了来自物体的载有物像信息的直射光(子弹光), 可见光和红外光在烟雾介质中传输的光学能见度远小于光子在其中的平均自由程。因此, 区分出这两种光, 并降低蛇形光的比分, 提取子弹光进行成像, 将有效地提高光学能见度。这对改善云雾天气的交通及现代战争中光电对抗技术的发展无疑具有重要的意义。本文从理论和实验两方面对这一问题作了探讨, 得出一些有实际意义的结论。

## 2 理论分析

### 2.1 光在云雾中的成像分析

基于光量子特性及与介质中的分子或粒子相互作用的多次散射理论模型, 当一超快平面光波入射某一厚度为  $Z$  的平板随机介质后的光强  $I_z$  为<sup>[3]</sup>

$$I_z(t) = (D/\pi Z^2) \sum_{m=1}^{\infty} \{m(\pi Z/d)^2 \sin(m\pi Z/d) \times \exp[-Dt(m\pi/d)^2] \times \exp(-\nu t/l_a)\} \quad (1)$$

式中  $D = cl_i/3$  为漫射系数,  $d = Z + 2Z_0$ ,  $Z_0 = 0.714l_i$ ,  $c$  为光速,  $Z$  为随机介质厚度,  $l_i$  为平均传输自由程,  $l_a$  为吸收长度。

全部漫射光强可由公式(1)对时间  $t$  从 0 到  $\infty$  积分求得

\* 浙江省自然科学基金资助项目。

$$I_t = \frac{\sinh[\sqrt{3d^2/l_s l_a}(1 - Z/d)]}{2\sinh \sqrt{3d^2/l_s l_a}} \quad (2)$$

则接收立体角为  $\Omega$  的探测器所接收到的部分漫射光强为

$$I_{t'} = I_t \Omega \quad (\Omega \text{ 一般为 } 10^{-7} \text{ rad}) \quad (3)$$

另一方面载有物像信息的子弹光为探测器接收的光强度  $I_c$  为

$$I_c = f \exp[-Z(1/l_s + 1/l_a)] \quad (4)$$

式中  $l_s$  为光子平均散射自由程,  $f$  为实验检测系统能有效接收份额的系数。当光子在介质中传输与介质粒子的碰撞次数足够多时, 可近似用 Monte Carlo 方法模拟光在浓烟雾介质中的传输, 并可计算出  $l_s$  为<sup>[4]</sup>

$$l_s = 1/n\sigma_s \quad (5)$$

式中  $\sigma_s$  为烟雾粒子的散射截面, 它与烟雾粒子直径  $D_\mu$  的关系为

$$\sigma_s \approx \pi D_\mu^2/2 \quad (6)$$

## 2.2 子弹光强度与传输距离的理论计算

根据(4)式可知, 子弹光在烟雾介质中传输的距离不仅仅与介质的密度和直径有关, 而且与其含水量(反映在吸收长度上)有很大的关系。由于实验室条件的限制, 我们把浓烟雾(由重力烟雾油加热产生, 估计其数密度  $n = 10^{10}/\text{m}^3$ , 中直直径  $D_\mu = 10 \mu\text{m}$ )作为研究对象, 可求得光子传输的平均自由程为 0.64 m。在不考虑吸收( $Z \ll l_a$ )的条件下, 计算可得光通过厚度为  $Z$  的随机介质后的子弹光光强与原入射处的光强比(相对光强  $I_{cm}$ )与介质厚度  $Z$  的变化关系, 如表 1 所示。在这种烟雾中, 子弹光传播距离  $Z = 0.64 \text{ m}$  时其强度衰减成原光强的 37%, 而在传播至 3.20 m 处仍有 0.67% 的子弹光存在。

表 1 子弹光相对强度  $I_{cm}$  与传输距离  $Z$  之间的关系

Table 1 Relationship between relative intensity of the ballistic light  $I_{cm}$  and the transmission distance  $Z$

$Z$	$l_s$	$2l_s$	$3l_s$	$4l_s$	$5l_s$
$I_{cm}$	37%	13.5%	4.9%	1.8%	0.67%

## 3 基于光的偏振特性分析成像的实验方法

根据子弹光在传播中其状态保持不变的特性, 我们提出一种用唯像的偏振光方法检测子弹光和蛇形光存在与否, 并测出子弹光比分及子弹光强度与传播距离关系的实验方法。

实验装置如图 1 所示,  $\overline{\quad}$ ,  $\overline{\quad}$  和  $\overline{\quad}$  为偏振方向平行, 并共轴平行等距(间距为  $L_1 = L_2 = L$ )放置的三块偏振片。在两个间隔中均放置同样光学物性的烟雾状随机介质。实验测出在准直光束视向方向上各偏振片背侧的光强  $I_1$ ,  $I_2$  和  $I_3$ 。

设偏振光  $I_1$  中有  $X$  百分数的子弹光无散射与吸收直接到达偏振片  $\overline{\quad}$ , 有  $Y$  百分数的经多重散射而能到达偏振片  $\overline{\quad}$  的蛇形光, 另外在  $L_1$  介质中有  $Z$  百分数的漫射光逸出视向方向或被吸收, 故有  $X + Y + Z = 1$ 。

由于在  $L_1$  介质中到达偏振片  $\overline{\quad}$  的蛇形光经多重散射后消偏而成自然光。据马吕斯定律, 在偏振片  $\overline{\quad}$  的背侧测得的偏振光强  $I_2$  应由下式表达

$$I_2 = XI_1 + \frac{1}{2}YI_1 \quad (7)$$

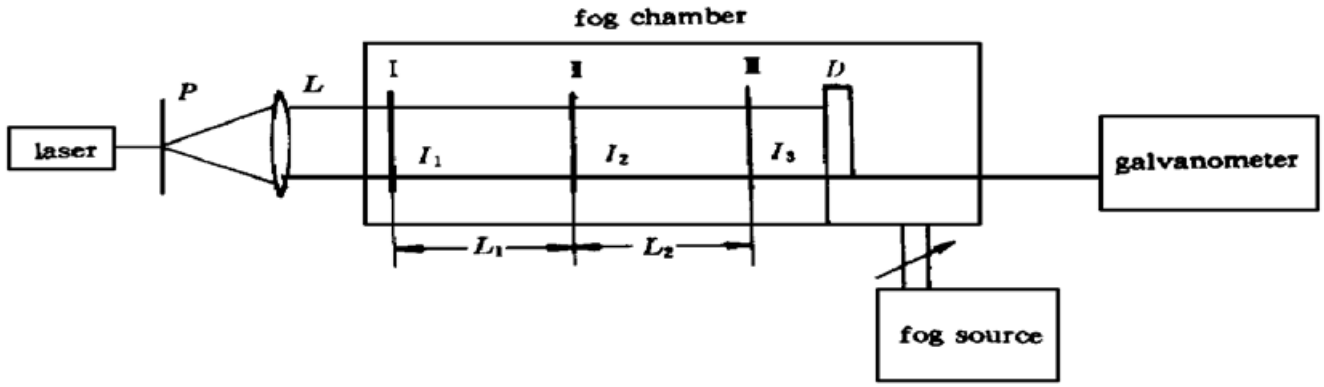


图 1 检测子弹光和蛇形光光强的实验装置图

Fig. 1 Optical schematic diagram of detecting the ballistic light and the snake light intensity  
 ; ; : polarisers; D: detector

而偏振光强  $I_2$  通过同样间隔同样光学物性的随机浓烟雾状介质后, 在偏振片  $\text{---}$  的背侧测得的偏振光强  $I_3$  应为

$$I_3 = X^2 I_1 + \frac{1}{2} Y (X I_1) + \frac{1}{2} Y \left[ \frac{1}{2} Y I_1 \right] \quad (8)$$

式中第一项为载有物像信息的子弹光光强; 第二、三项均为经过介质多重散射的蛇形光通过偏振片  $\text{---}$  的不载物像信息的偏振光光强。联立(7), (8) 两式可得

$$X = \frac{I_2 + \sqrt{4I_1 I_3 - 3I_2^2}}{2I_1} \quad (9)$$

$$Y = - \frac{I_2 - \sqrt{4I_1 I_3 - 3I_2^2}}{I_1} \quad (10)$$

因此, 测出偏振光光强  $I_1, I_2, I_3$ , 由(9), (10) 两式可求得  $X, Y$  的值, 从而验证子弹光和蛇形光的存在, 进而分析光在烟雾中传输的物理行为和应用前景。

实验光源采用输出功率为 8 mW, 单模输出的 He-Ne 激光器, 经扩束、准直后获得一光强均匀的平行光,  $\text{---}, \text{---}$  是直径为 30 mm, 带有最小分度角为  $5^\circ$  的偏振片, 光强检测器由高灵敏度的硅光电池及 AC-15/4 型光电检流计组成。实验中的薄烟雾介质由木糠发烟(其直径约为  $6 \mu\text{m}$ , 数密度为  $10^6/\text{m}^3$ , 含水量可以忽略) 来模拟; 浓烟雾由重力烟雾油加热发烟(其直径约为  $10 \mu\text{m}$ , 数密度为  $10^{10}/\text{m}^3$ , 含水量可以忽略) 来模拟。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 传输距离 $L$ 一定( $L= 0.64 \text{ m}$ ) 时, 在不同介质条件下子弹光和蛇形光强度的变化

由于烟雾浓度的精确控制有一定的难度, 只列出在无雾、典型薄雾和浓雾模拟条件下实测子弹光和蛇形光的相对光强及  $X$  和  $Y$  值(见表 2)。当无随机介质时, 偏振光  $I_1$  连续通过偏振方向相同的偏振片  $\text{---}, \text{---}$  后, 应有  $I_1 = I_2 = I_3$ , 子弹光比分  $X = 100\%$ , 蛇形光比分  $Y = 0$ 。但实测结果  $I_1, I_2$  和  $I_3$  差异很大, 这主要是偏振片的吸收引起的。因此, 首先要根据无介质时的实验值  $I_{1c}, I_{2c}, I_{3c}$ , 求得光强因偏振片吸收而衰减的系数  $\alpha = I_{2c}/I_{1c} = 0.318$ , 在计算  $X$  与  $Y$  时需将其扣除。

表 2 不同介质条件下子弹光和蛇形光强度的变化关系

Table 2 Relationship between the ballistic light's percentage  $X$  and the snaky light's percentag  $Y$  in different medium conditions

$L = 0.64 \text{ m}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$X$	$Y$
no medium	1050	334	107	1.0	0
thin fog	1050	330	105	1.0	0
thick fog	1050	110	20	0.49	0.32

实验表明: 当没有随机介质存在时, 接收到的只有子弹光, 而没有蛇形光。当为典型薄雾时, 由于传输距离较近和实验精度所限, 测量结果与不存在烟雾时的数据无多大的差异; 随着雾浓度的增加, 实验测得  $I_2$  和  $I_3$  逐渐减少, 求得  $X$  值相应减小,  $Y$  不再为零, 表明随着烟雾浓度的增加, 蛇形光强度增强, 载有物像信息的子弹光强度减弱。在实验中, 还发现雾的浓度的变化与光强  $I_2$  或  $I_3$  的变化存在较稳定的关系, 这反过来为检测烟雾浓度提供了一个新思路。

4.2 在典型浓雾介质条件下, 子弹光相对光强与传输距离之间的关系验证

表 3 中  $L = 0.64 \text{ m}$ , 并已对偏振片的吸收作了修正, 其结果与不计吸收时的理论计算值 (公式(4)) 基本一致(虽然实测偏小, 且偏小量随着传输距离的增加而增大, 这主要是介质吸收所致, 如果对吸收作出修正, 数据基本吻合)。证明了基于光粒子性的光子与介质中的分子或粒子相互作用的理论模型来分析光在烟雾中传输的可行性。

表 3 子弹光相对光强  $I_{cm}$  与传输距离  $Z$  之间的关系

Table 3 Relationship between the relative intensity of the ballistic light  $I_{cm}$  and the transmission distance  $Z$

$Z$	$L$	$2L$	$3L$	$4L$	$5L$
$I_{cm}$	32%	11.6%	3.6%	1.0%	0.44%

4.3 在典型浓雾模拟条件下, 相对光强  $I_{2c}$  与偏振片  $\vec{I}, \vec{I}'$  的检偏角差值  $\alpha$  的关系 ( $L = 0.64 \text{ m}$ )

从图 2 可知, 当没有随机介质存在时,  $I_{2c}$  与  $\alpha$  的关系符合马吕斯定律。当光在典型浓雾中传输时,  $I_{2c}$  与  $\alpha$  的关系明显不符合马吕斯定律。进一步实验表明, 随着烟雾浓度的增加, 测量结果与马吕斯定律偏离程度越大, 特别是当  $\alpha = 90^\circ$  时,  $I_{2c}$  的值在浓雾条件下接近 20%, 这证明了散射的强烈消偏性, 蛇形光成为降低能见度的主要原因。因此, 采用偏振的方法, 可滤去部分蛇形光, 提高子弹光的份额, 是提高雾视能见度的有效手段。

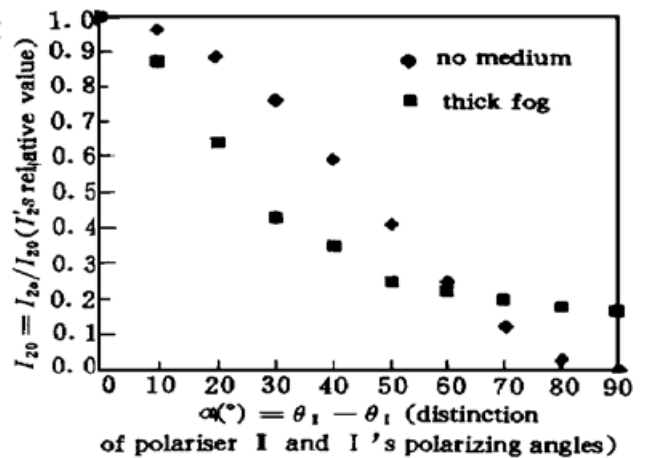


图 2 相对光强  $I_{2c}$  与偏振片  $\vec{I}, \vec{I}'$  的检偏角差值  $\alpha$  的关系

Fig. 2  $I_{2c}$  ( $I_{2c}$ 's relative value) as a function of distinction of polarizing angles of polariser  $\vec{I}$  and polarizer  $\vec{I}'$

子弹光成像的课题实际上也就是高噪光背景下物像信息提取的一个方面。基于光的粒子性, 结合光子与介质分子的相互作用的多次散射理论, 是解决这一实际课题的有效方法之一。

致谢 在本文的写作过程中, 浙江大学陈抗生教

授给予了细心的指导;田维坚博士后与我们进行了有益的讨论;本校潘竞范老师给予我们的工作很大的帮助。在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- 1 Akira Ishimaru. Wave Propagation and Scattering in Random Media. New York : Academic Press, 1978. 362
- 2 P. S. Mudgeett, L. W. Richards. Multiple scattering calculations for technology. *Appl. Opt.*, 1971, **10** (7) : 1485~ 1502
- 3 K. M. Yoo, Feng Liu, R. R. Alfano. Imaging through a scattering wall using absorption. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(14) : 1068~ 1070
- 4 R. Graaff, M. H. Koelink, F. F. M. de Mule *et al.*. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(4) : 426~ 434

## A New Method of Analyzing Imagings in Fog

Sui Chenghua Xu Zhijun

(Research Institute of Technical Physics Zhejiang University of Technology Hangzhou 310014)

**Abstract** In this paper, the transmission situation of a ballistic light carrying the information of the object image in fog is analyzed. Its intensity reduction and traveling distance limitation are discussed. This new kind of experimental method based by the characteristic of a polarized light is presented. The experimental result which is in good agreement with theory is given. The probabilities of increasing signal-to-noise ratio and enhancing the quality of an imaging in fog with this experimental method are discussed.

**Key words** imaging in fog, ballistic light, high noisylight