

doi:10.3788/gzxb20184712.1201001

# 基于 Monte Carlo 方法的雾红外传输仿真及分析

王婷,徐军,赵选科,孙红辉,高旻,孙琦云

(火箭军工程大学 基础部,西安 710025)

**摘 要:**为了研究多次散射效果下红外辐射在雾中的传输衰减特性,基于 Mie 散射理论,计算了 1.064  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  激光在平流雾和辐射雾中的消光参量和多粒子散射相位函数.利用 Monte Carlo 法建立了辐射传输模型,分析了多次散射效应下接收屏、能见度和传输距离对透过率的影响,并与 Lambert-Beer 定律计算结果进行了比较.结果表明:当能见度和传输距离均为 1 km 时,1.064  $\mu\text{m}$  激光在平流雾中的接收屏粒子数随接收屏边长的增加而显著增加;相同的能见度和传输距离下,激光在辐射雾中的衰减小于在平流雾中的衰减;10.6  $\mu\text{m}$  激光在平流雾中具有很好的传输性;当粒子散射能力越强、前向散射概率越大时,多次散射对透过率的贡献越明显;激光在雾中的传输衰减特性不仅与消光系数有关,还与散射系数密切相关;能见度和传输距离存在最佳组合,使得此传输条件下多次散射对透过率的贡献最大.

**关键词:**大气光学;透过率;红外波段;雾;多次散射;Monte Carlo 方法;衰减特性

中图分类号:P407.6

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1201001-11

## Simulation and Analysis of Infrared Radiation Transmission in Fog Based on Monte Carlo Method

WANG Ting, XU Jun, ZHAO Xuan-ke, SUN Hong-hui, GAO Yang, SUN Qi-yun

(Basic Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** In order to study the transmission characteristics of infrared radiation in fog under multiple scattering effect, the extinction parameters and multi-particle scattering phase functions of 1.064  $\mu\text{m}$ , 3.8  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$  laser in advection fog and radiation fog were calculated based on Mie theory. A radiative transfer model was established by Monte Carlo method. The effects of the size of the receiving screen, the visibility and the transmission distance on the transmittance were analyzed, and the results were compared with Lambert-Beer law. The results show that when the visibility and transmission distance are both 1 km, the number of particles on the receiving screen of 1.064  $\mu\text{m}$  laser in advection fog increases significantly with the increase of receiving screen side length. The attenuation of laser in radiation fog is less than that in advection fog under the same visibility and transmission distance. 10.6  $\mu\text{m}$  laser has good transport properties in advection fog. The stronger the scattering ability and the higher the forward scattering probability, the more obvious the contribution of multiple scattering to the transmittance. The attenuation characteristics of laser transmission in fog are related to extinction coefficient and scattering coefficient. There is an optimal combination of visibility and transmission distance which maximizes the contribution of multiple scattering to the transmittance.

**Key words:** Atmospheric optics; Transmittance; Infrared wavelength; Fog; Multiple scattering; Monte Carlo method; Attenuation characteristic

**OCIS Codes:** 010.1320; 040.3060; 290.5850; 290.4210; 120.7000

基金项目:国家自然科学基金(No. 61701505)和陕西省自然科学基金(No.2018JQ6080)资助

第一作者:王婷(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为红外辐射在雾中的传输特性. Email: wangt6105@163.com

导师:徐军(1963-),男,教授,硕士,主要研究方向为光电成像、光电对抗和强激光武器. Email: yujun63@sohu.com

收稿日期:2018-07-13;录用日期:2018-09-13

## 0 引言

雾对红外线存在严重的散射和吸收效应,导致红外装备效能下降,因此研究雾中红外辐射传输衰减特性具有重要意义<sup>[1-2]</sup>.FLECKER B<sup>[3]</sup>和IJAZ M等<sup>[4]</sup>分析了雾对自由空间光通信的影响;HAEFFELIN M等<sup>[5]</sup>通过测量雾的后向散射衰减,提出了一种预报辐射雾的算法;段亚博等<sup>[6]</sup>研究了雾的后向散射对激光测距的影响;魏昊明等<sup>[7]</sup>分析了雾和气溶胶前向散射的消光特性,并给出了前向散射修正因子随粒子平均半径和视场乘积的经验关系式.上述研究大多基于 Lambert-Beer 定律,而 Lambert-Beer 定律局限于粒子单次散射条件.在实际的雾传输过程中,多次散射现象不可避免,特别是在雾浓度较高、传输距离比较近等情况下,多次散射现象不容忽视<sup>[8-9]</sup>.

随着计算机技术的不断发展, Monte Carlo 方法被广泛应用于存在多次散射现象的辐射传输仿真上.基于此方法, LAAN J D V D 等<sup>[10]</sup>分析了圆偏振光较线偏振光在雾环境中的传输优势; GRABNER M 等<sup>[11]</sup>研究了雨雾粒子多次散射对自由空间光通信的影响; STILLWELL R A 等<sup>[12]</sup>对高功率激光雷达在不同气象条件下的安全性进行了分析; 张泽宇等<sup>[13]</sup>分析出在相同传输条件下 3.8  $\mu\text{m}$  激光比 1.55  $\mu\text{m}$  激光衰减更小,更适合在雾中进行水平链路的自由空间光通信; 张硕等<sup>[14]</sup>对水雾的消光性能进行了研究,指出提高水雾的浓度并减小粒子半径可有效提高水雾的衰减作用; 丁瑛等<sup>[15]</sup>研究了大气环境雾滴流输运和颗粒局部聚集效应下颗粒间的碰撞过程; 王蓉蓉等<sup>[16]</sup>对太赫兹波和红外在雾中的传输特性进行了研究; 林勇等<sup>[17]</sup>分析了雾环境下近红外信号的传输衰减特性,并提出辐射雾环境下最优化通信链路几何构架.仿真中存在着将雾滴粒子的半径视为均等,采用 Henyey-Greenstein 相位函数代替 Mie 散射相位函数,或完全依赖经验公式计算消光参量等做法.可在实际的雾散射问题中,不可能遇到单一粒径和光学性质完全等同的雾滴粒子群<sup>[18]</sup>,上述做法虽然简化了仿真的复杂性,但使得计算结果存在一定误差或者适用范围有限.

本文基于 Mie 散射理论得到粒子群的消光参量和散射相位函数,并作为 Monte Carlo 的仿真参量.基于 Monte Carlo 方法分析了 1.064  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  在平流雾和辐射雾中的传输衰减特性,气象条件选择中雾(能见度 200~500 m)、轻雾(能见度 500~1 000 m)、薄雾(能见度 1~2 km)和霾(能见度 2~4 km),最后将 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 定律计算结果进行比较,指出多次散射对透过率造成的影响.

## 1 雾的消光特性

雾是由近似为球形的雾滴粒子组成,半径通常在 1~60  $\mu\text{m}$  之间.由于雾的粒子半径不全部相同,雾的消光特性是粒子群中全部粒子消光效果的叠加.因此在研究雾滴粒子的光散射问题时,特别是针对平流雾和辐射雾这两种雾介质,采用基于 Mie 散射理论的多粒子散射研究方法,可以得到比较可靠的结果.

### 1.1 雾滴谱分布模型

目前雾滴谱分布中使用最多的是广义 Gamma 分布,其表达式为

$$n(r) = ar^a \exp(-br^\beta) \quad (1)$$

式中,  $n(r)$  为单位体积、单位半径间隔内的雾滴粒子数,  $r$  为粒子半径,  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  为谱分布参量.

根据形成雾的地域和机理,可把雾分成平流雾和辐射雾两大类,海雾通常为平流雾,而内陆雾通常为辐射雾.基于 Gamma 分布模型的,平流雾和辐射雾的谱分布与能见度的经验公式分别为<sup>[19]</sup>

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-0.8359V^{0.43}r) \quad (2)$$

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122V^{0.54}r) \quad (3)$$

式中,  $V(\text{km})$  为能见度,  $r(\mu\text{m})$  为雾滴粒子半径,谱分布  $n(r)$  的单位为  $(\text{m}^{-3} \mu\text{m}^{-1})$ .

取能见度为 1 km,平流雾和辐射雾的谱分布如图 1 所示.由图 1 可知,当能见度为 1 km 时,随着粒子半径的增加,两种雾的谱分布曲线均先增加后减小,且两种雾的浓度在半径较小一侧迅速增大,在半径大的一侧则缓慢减小.其中平流雾的雾滴粒子半径较集中在 2~5  $\mu\text{m}$ ,辐射雾的雾滴粒子半径较集中在 0.1~2  $\mu\text{m}$ ,且辐射雾粒子浓度约大于平流雾粒子浓度两个数量级.

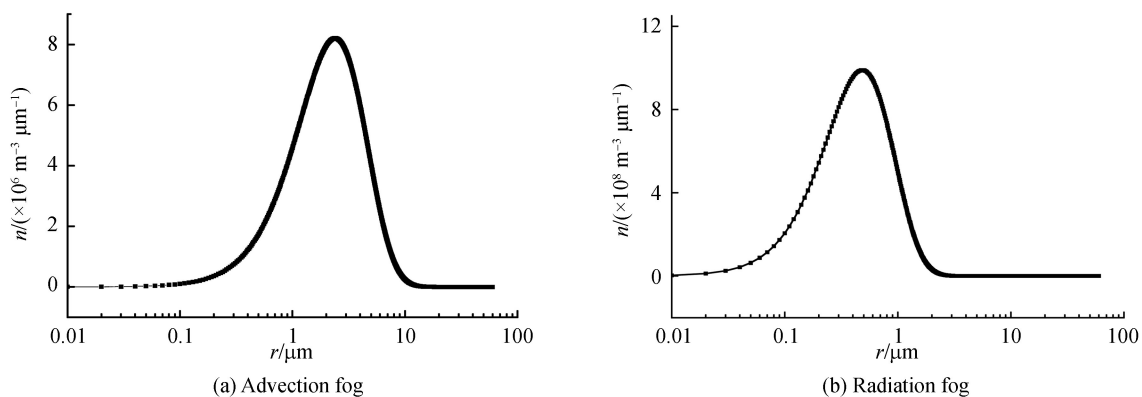


图1 能见度为 1 km 时平流雾和辐射雾谱分布

 Fig.1 Advection fog and radiation fog particle size distribution with  $V=1$  km

## 1.2 散射、吸收和消光系数

雾是由粒子半径和光学性质不完全相同的雾滴粒子群组成的多分散系,多分散系的总散射、吸收和消光截面为其所有尺度的粒子的散射、吸收和消光截面之和,多分散系的散射、吸收和消光系数为单位体积内的总散射、吸收和消光截面,所以雾滴粒子群的散射、吸收和消光系数为<sup>[18]</sup>

$$\beta_{\text{sca,abs,ext}} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} C_{\text{sca,abs,ext}} n(r) dr \quad (4)$$

式中, $\beta_{\text{sca}}$ 、 $\beta_{\text{abs}}$ 和 $\beta_{\text{ext}}$ 分别为雾滴粒子群的散射、吸收和消光系数; $r$ 为粒子半径, $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 为最小和最大半径, $n(r)$ 为粒子谱分布; $C_{\text{sca}}$ 、 $C_{\text{abs}}$ 和 $C_{\text{ext}}$ 分别为单个雾滴粒子的散射、吸收和消光截面,可表示为

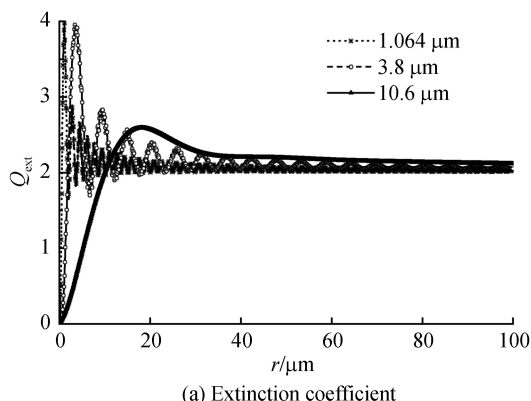
$$\begin{cases} C_{\text{ext}}(\alpha, n) = Q_{\text{ext}}(\alpha, n) \cdot \pi r^2 \\ C_{\text{sca}}(\alpha, n) = Q_{\text{sca}}(\alpha, n) \cdot \pi r^2 \\ C_{\text{abs}} = C_{\text{ext}} - C_{\text{sca}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\alpha = 2\pi r/\lambda$ 为粒子的尺度参量, $n$ 为粒子的复折射率, $Q_{\text{sca}}$ 、 $Q_{\text{abs}}$ 和 $Q_{\text{ext}}$ 分别为单个雾滴粒子的散射、吸收和消光效率因子, $Q_{\text{sca}}$ 、 $Q_{\text{abs}}$ 和 $Q_{\text{ext}}$ 可由 Mie 散射理论计算得出<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} Q_{\text{ext}}(\alpha, n) = \frac{2}{\alpha^2} \text{Re} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1)(a_m + b_m) \\ Q_{\text{sca}}(\alpha, n) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1)[|a_m|^2 + |b_m|^2] \\ Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $a_m$ 、 $b_m$ 为 Mie 散射系数。

基于 Mie 散射理论由式(5)和(6)计算得出雾滴粒子的消光效率因子和消光截面,如图 2.其中雾滴粒子对于 1.064  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长的复折射率分别取  $1.320 + i1.259 \times 10^{-6}$ 、 $1.347 + i3.402 \times 10^{-3}$  和  $1.178 + i0.071$ 。



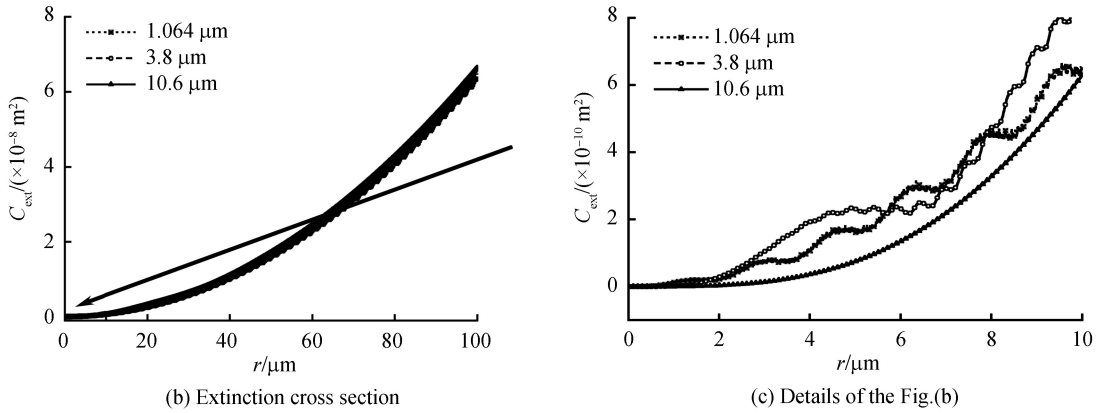


图2 雾滴粒子消光系数、消光截面随半径的变化

Fig.2 Extinction coefficient and extinction cross section of the particle changes with the radius

由图 2(a)可知,随着粒子半径的增加,1.064  $\mu\text{m}$  和 3.8  $\mu\text{m}$  的消光效率因子上下振荡逐渐趋近于 2,10.6  $\mu\text{m}$  的消光效率因子先增加后减小逐渐趋近于 2.由图 2(b)可知,整体上看三波段的消光截面,均随着半径的增加而增加且数值十分接近,但由图 2(c)可知,1.064  $\mu\text{m}$  和 3.8  $\mu\text{m}$  的消光截面曲线波动式上升,且三波段消光截面数值存在一定差别.

基于 Mie 散射理论和平流雾、辐射雾谱分布模型,由式(2)~(6)计算得到不同能见度下平流雾、辐射雾的消光参量,见表 1、2.由表 1 和表 2 可知,在平流雾中,相同能见度下三波段的消光系数由小到大排序,依次是 10.6  $\mu\text{m}$ 、1.064  $\mu\text{m}$  和 3.8  $\mu\text{m}$ ,吸收系数由小到大排序,依次是 1.064  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ ;在辐射雾中,相同能见度下三波段的消光系数由小到大排序,依次是 10.6  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$ ,吸收系数由小到大排序,依次是 1.064  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ .平流雾中处于中间段的中红外(3.8  $\mu\text{m}$ )比近红外(1.064  $\mu\text{m}$ )和远红外(10.6  $\mu\text{m}$ )都具有更强的消光系数,这是因为平流雾粒子半径较集中在 2~5  $\mu\text{m}$ ,而辐射雾粒子半径较集中在 0.1~2  $\mu\text{m}$ .由图 2(c)可知,半径在 2~5  $\mu\text{m}$ ,消光截面中红外(3.8  $\mu\text{m}$ )大部分大于近红外(1.064  $\mu\text{m}$ )和远红外(10.6  $\mu\text{m}$ ),而半径在 0.1~2  $\mu\text{m}$ ,消光截面近红外(1.064  $\mu\text{m}$ )大部分大于中红外(3.8  $\mu\text{m}$ )和远红外(10.6  $\mu\text{m}$ ).

表 1 不同能见度下平流雾的消光参量(单位: $\text{km}^{-1}$ )Table 1 Extinction parameters of advection fog under different visibility (unit:  $\text{km}^{-1}$ )

Visibility	1.064 $\mu\text{m}$		3.8 $\mu\text{m}$		10.6 $\mu\text{m}$	
	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$
0.5 km	8.508 1	$1.06 \times 10^{-3}$	9.800 4	0.719 8	5.968 5	2.726 2
1 km	4.330 0	$3.96 \times 10^{-4}$	5.290 6	0.277 5	2.242 4	1.127 3
2 km	2.206 9	$1.50 \times 10^{-4}$	2.843 8	0.104 4	0.799 7	0.451 4

表 2 不同能见度下辐射雾的消光参量(单位: $\text{km}^{-1}$ )Table 2 Extinction parameters of radiation fog under different visibility (unit:  $\text{km}^{-1}$ )

Visibility	1.064 $\mu\text{m}$		3.8 $\mu\text{m}$		10.6 $\mu\text{m}$	
	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$	$\beta_{\text{ext}}$	$\beta_{\text{abs}}$
0.5 km	8.778 6	$2.21 \times 10^{-4}$	6.727 7	0.148 4	0.918 1	0.728 6
1 km	3.612 3	$6.18 \times 10^{-5}$	1.664 5	0.040 4	0.237 8	0.205 7
2 km	0.977 8	$1.24 \times 10^{-5}$	0.280 2	0.007 9	0.045 3	0.041 2

### 1.3 散射相位函数

基于 Mie 散射理论,对于单个球形雾滴粒子的散射相位函数可表示为

$$P(\theta) = \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{2\pi\alpha^2 Q_{\text{sca}}} \quad (7)$$

式中, $S_1(\theta)$ 和  $S_2(\theta)$ 为散射振幅, $\alpha = 2\pi r/\lambda$  为粒子的尺度参量, $Q_{\text{sca}}$ 为散射效率因子.

雾滴粒子群的散射相位函数可由单位体积内所有粒子取平均得到,则粒子群散射相函数为

$$P_{\text{fog}}(\theta) = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} Q_{\text{sca}}(r)n(r)\pi r^2 p(\theta) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} Q_{\text{sca}}(r)n(r)\pi r^2 dr} \quad (8)$$

式中,  $p(\theta)$  为单个粒子散射相位函数,  $r$  为粒子半径,  $Q_{\text{sca}}$  为散射效率因子,  $n(r)$  为粒子谱分布函数。

根据式(2)、(3)、(6)~(8),取能见度为 1 km,计算得到三波段在平流雾和辐射雾中的散射相函数,结果如图 3 所示。散射相位函数是散射角度的函数,反映了光子与粒子发生碰撞后,光子的散射角在各方向上的概率。由图 3 可知,光子与雾滴粒子发生碰撞时,散射角在前几度的小角度内的概率较高,在其他方向上则较低,不同情况下的前向的散射相位函数相差明显,三波段在平流雾中的前向的相位函数比在辐射雾的约大一个数量级。相同雾介质中,1.064  $\mu\text{m}$  的前向的相位函数大于 3.8  $\mu\text{m}$ ,3.8  $\mu\text{m}$  大于 10.6  $\mu\text{m}$ 。说明相同辐射波下,平流雾的前向散射能力强;相同的雾介质中,1.064  $\mu\text{m}$  的前向散射能力大于 3.8  $\mu\text{m}$ ,3.8  $\mu\text{m}$  大于 10.6  $\mu\text{m}$ 。

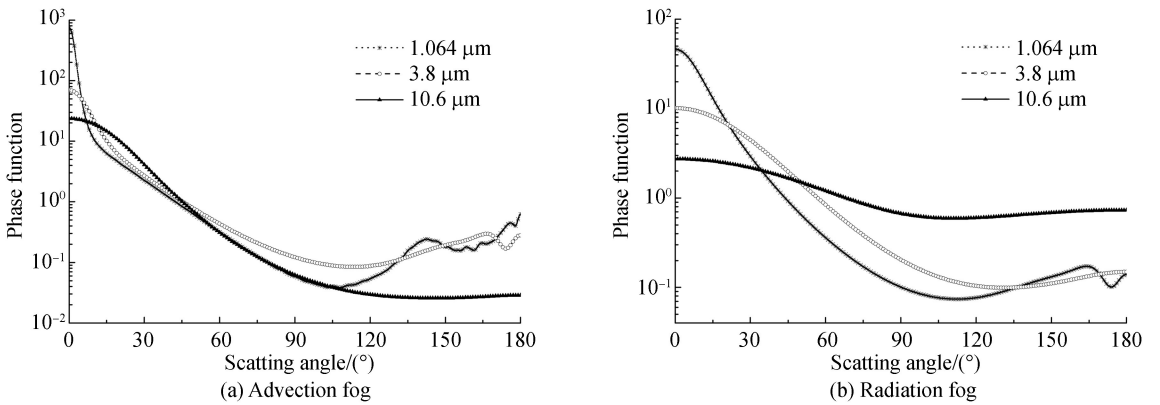


图 3 能见度为 1 km 时平流雾和辐射雾散射相函数  
Fig.3 Advection fog and radiation fog scattering phase functions with  $V=1$  km

## 2 Monte Carlo 仿真模型

Monte Carlo 方法主要是利用随机数来模拟光子在介质中的“行为”,根据设定的传输条件和需要解决的问题,当光子数量足够多时,其统计的样本即为该条件下的解。当能见度较低时,雾天大气衰减主要来自光子与雾滴粒子碰撞时的散射和吸收,分子的吸收和散射忽略不计。Monte Carlo 仿真雾天大气传输主要过程为:光子从固定的光子源沿设定的正方向发射,设定雾介质的种类和传播距离,基于雾的消光特性,计算雾的消光系数和吸收系数,进而得到光子行进步长、吸收或散射判据;根据雾滴粒子群的散射相函数,抽样得到光子每次碰撞的相位角,和由随机数决定的方位角,一起确定光子的运动方向。重复以上过程直到该光子被吸收、逸出或打到接收屏。当发射足够多的光子时,接收屏处即可得到较为稳定的统计结果。

### 2.1 光子步长与散射吸收判定

光子沿  $Z$  轴正方向发射,初始坐标为  $(0,0,0)$ ,第一次碰撞点为  $(0,0,l_1)$ , $l_1$  为第一次光子行进步长。根据 Lambert-Beer 定律,对分布函数进行抽样,得到光子发生下次碰撞需要行进的步长  $l$  为

$$l = -\frac{\ln r_1}{\beta_{\text{ext}}} \quad (9)$$

式中, $r_1$  为 0 到 1 之间均匀分布的随机数, $\beta_{\text{ext}}$  为雾滴粒子群的消光系数。

根据雾滴粒子群的消光系数、吸收系数,设置阈值  $H = \beta_{\text{abs}}/\beta_{\text{ext}}$ ,来判断光子在碰撞时是被吸收还是散射<sup>[7]</sup>。当  $r_2 < H$  时,光子被吸收,当  $r_2 > H$  时,光子被散射, $r_2$  为 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

### 2.2 光子碰撞点及散射方向计算

散射相位函数转化为分布函数后进行抽样,利用 0 到 1 范围内均匀分布的随机数  $r_3$  来获得每次碰撞的散射角  $\theta$ 。由于雾滴粒子被视为球形,其在垂直传输方向的平面上具有各向同性,所以相位角  $\varphi = 2\pi r_4$ , $r_4$  为



0 到 1 之间均匀分布的随机数。

设光子以散射角  $\theta_1$ 、方位角  $\varphi_1$  到达此时碰撞点,坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ ;再以散射角  $\theta$ 、方位角  $\varphi$  到达碰撞点  $(x_2, y_2, z_2)$ .则光子在碰撞点  $(x_1, y_1, z_1)$  的坐标系时

$$\begin{cases} x = l \sin \theta \cos \varphi \\ y = l \sin \theta \sin \varphi \\ z = -l \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

将  $y$  坐标轴逆时针旋转  $\theta_1$ ,可得

$$\begin{cases} x_0 = x \cos \theta_1 - z \sin \theta_1 \\ y_0 = y \\ z_0 = x \sin \theta_1 + z \cos \theta_1 \end{cases} \quad (11)$$

再将  $z$  坐标轴逆时针旋转  $\varphi_1$ ,可得

$$\begin{cases} x_{01} = x_0 \cos \varphi_1 - y_0 \sin \varphi_1 \\ y_{01} = x_0 \sin \varphi_1 + y_0 \cos \varphi_1 \\ z_{01} = z_0 \end{cases} \quad (12)$$

则  $(x_2, y_2, z_2)$  的表达式为

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + x_{01} \\ y_2 = y_1 + y_{01} \\ z_2 = z_1 + z_{01} \end{cases} \quad (13)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 接收率与接收屏大小的关系

发射光子数为  $10^6$  个,能见度为 1 km,传输距离为 1 km,激光发散角的数量级一般在  $10^{-3}$  rad 左右,所以设置接收屏边长为 0.5 m 至 5.5 m,间隔为 0.5 m. Monte Carlo 仿真结果如图 4 所示,横坐标 Side length 为接收屏边长,单位为 m,纵坐标屏幕接收率 Ratio 为屏幕接收到的粒子数与发射总光子数的比值。

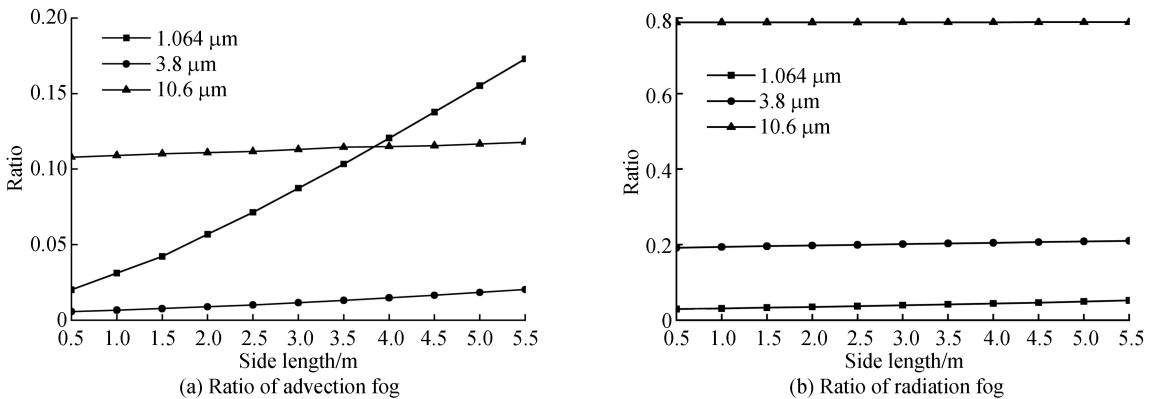


图 4 屏幕接收率与接收屏边长关系

Fig.4 The relationship between screen receiving rate and screen length

由图 4(a)可知,当能见度和传输距离均为 1 km 时,在平流雾介质中传输时,1.064  $\mu\text{m}$  的屏幕接收率与边长存在较明显的正相关关系,而 3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  的屏幕接收率基本不受接收屏边长影响.3.8  $\mu\text{m}$  的屏幕接收率小于 1.064  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$ ,在接收屏边长小于 4 m 时,10.6  $\mu\text{m}$  的屏幕接受率大于 1.064  $\mu\text{m}$ ,当接收屏边长大于 4 m 时则相反.且在传输过程中,三种辐射波均产生了较大衰减.由图 4(b)可知,在辐射雾介质中传输时,三种辐射波的屏幕接收率基本不受接收屏边长影响,且 10.6  $\mu\text{m}$  的屏幕接收率明显大于 3.8  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$ ,3.8  $\mu\text{m}$  的屏幕接收率大于 1.064  $\mu\text{m}$ .且在传输过程中,10.6  $\mu\text{m}$  产生的衰减明显小于 3.8  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$ .

综合图 4(a)、(b)可知,当能见度和传输距离均为 1 km 时,研究 1.064  $\mu\text{m}$  在平流雾中的传输应该特别

考虑接收屏大小对透过率的影响,10.6  $\mu\text{m}$  在辐射雾中有很好的传输性。

### 3.2 透过率与传输距离的关系

取接收屏边长为 1 m,定义屏接收的粒子数与总发射的粒子数之比为透过率.发射光子数为  $10^6$  个,设能见度为 1 km,传输距离为 0.2 km 至 2.0 km,间隔为 0.2 km.Monte Carlo 仿真结果如图 5.

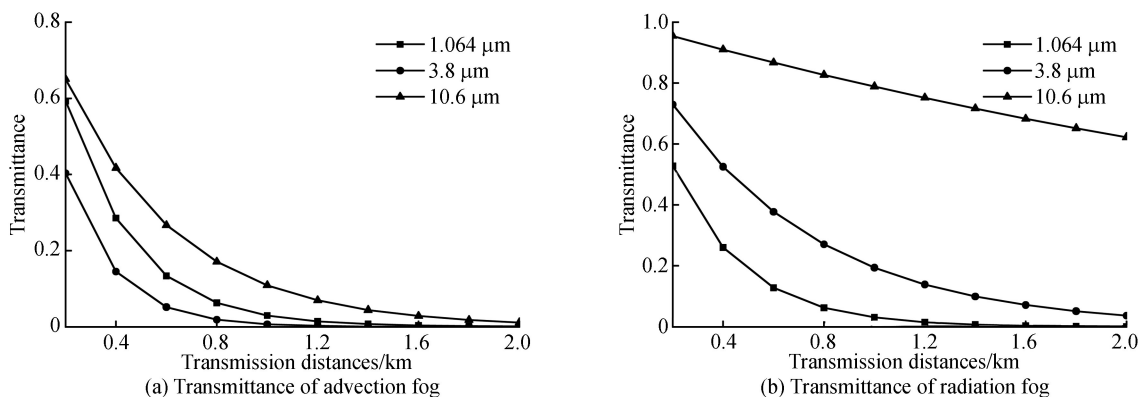


图 5 能见度为 1 km 时平流雾和辐射雾透过率随传输距离的变化

Fig.5 Advection fog and radiation fog transmittance change with transmission distance when visibility is 1 km

由图 5 可知,当能见度为 1 km 时,随着传输距离的增加,三种辐射波的透过率均逐渐减小.在相同的传输距离下,三种辐射波的衰减程度由小到大进行排序,在平流雾中依次是 10.6  $\mu\text{m}$ 、1.064  $\mu\text{m}$  和 3.8  $\mu\text{m}$ ,在辐射雾中依次是 10.6  $\mu\text{m}$ 、3.8  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$ ,且 10.6  $\mu\text{m}$  在辐射雾中表现出良好的传输性.这与表 1 和表 2 中的结果相吻合.相同传输距离下,3.8  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  在平流雾中的衰减均大于在辐射雾中的衰减,而 1.064  $\mu\text{m}$  则相反.由表 1 和表 2 可知,三波段对平流雾的消光系数均大于对辐射雾的.

由图 3 可知,1.064  $\mu\text{m}$  在平流雾中的前向散射最强.由表 1 和表 2 可知,1.064  $\mu\text{m}$  在平流雾中的散射系数( $4.3296 \text{ km}^{-1}$ )大于在辐射雾中的散射系数( $3.612 \text{ km}^{-1}$ ).说明 1.064  $\mu\text{m}$  在平流雾中前向散射大、散射能力强,多次散射对透过率的贡献较大,所以相同传输距离下,1.064  $\mu\text{m}$  在平流雾中的衰减小于在辐射雾中的衰减.

### 3.3 透过率与能见度的关系

根据气象学上的能见度对气象条件进行的分级<sup>[3]</sup>,选择中雾(能见度 200~500 m)、轻雾(能见度 500~1 000 m)、薄雾(能见度 1~2 km)和霾(能见度为 2~4 km)这四种级别进行研究.发射光子数为  $10^6$  个.设传输距离为 1 km,能见度分别为 0.2 km、0.5 km、1 km、1.5 km、2 km、2.5 km、3 km、3.5 km 和 4 km.Monte Carlo 仿真结果如图 6 所示.

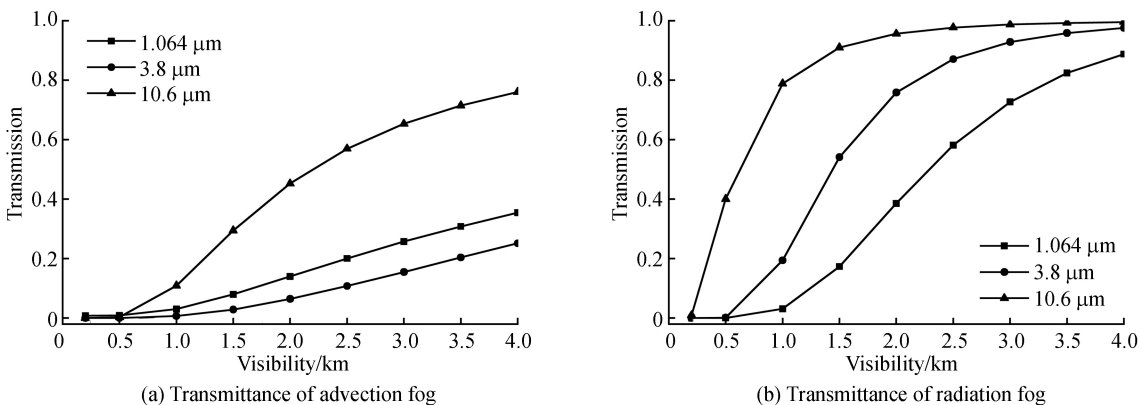


图 6 传输距离为 1 km 时平流雾和辐射雾透过率随能见度变化图

Fig.6 Advection fog and radiation fog transmittance change with visibility when transmission distance is 1 km

由图 6 可知,当传输距离为 1 km 时,随着能见度的增加,三种辐射波在平流雾和辐射雾中的透过率均

逐渐增加,且在相同的辐射波和能见度下,平流雾的衰减均大于辐射雾的衰减.相同能见度下三种辐射波衰减程度由小到大排序,在平流雾中依次是  $10.6\ \mu\text{m}$ 、 $1.064\ \mu\text{m}$  和  $3.8\ \mu\text{m}$ ,在辐射雾中依次是  $10.6\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$  和  $1.064\ \mu\text{m}$ .

由图 6(a)可知,平流雾中,在中雾和轻雾条件下  $1.064\ \mu\text{m}$  和  $3.8\ \mu\text{m}$  的衰减均十分严重,透过率接近为 0.在轻雾、薄雾和霾中, $10.6\ \mu\text{m}$  的透过率随着能见度的增加显著增加,而  $1.064\ \mu\text{m}$  和  $3.8\ \mu\text{m}$  的透过率增长缓慢.由图 6(b)可知,辐射雾中,在中雾和轻雾条件下, $10.6\ \mu\text{m}$  的透过率随着能见度的增加迅速增大,在薄雾条件下,增速减缓,在霾条件下,透过率逐渐稳定且值接近为 1. $1.064\ \mu\text{m}$  和  $3.8\ \mu\text{m}$  在中雾条件下衰减严重,透过率值接近为 0,在轻雾和薄雾条件下,透过率随着能见度的增加迅速增加,在霾条件下  $3.8\ \mu\text{m}$  透过率逐渐接近  $10.6\ \mu\text{m}$ .综合可知, $10.6\ \mu\text{m}$  在平流雾和辐射雾中均有很好的传输性,相同条件下辐射雾的衰减较小.

### 3.4 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果比较

Lambert-Beer 定律视粒子的散射过程与吸收过程等同,该方法局限于粒子的单次散射条件.在实际传输过程中,吸收现象使得光子不再向前传播,造成了能量的衰减.散射则是通过改变光子的行进方向,使接收到的粒子数减少,造成探测到的能量减小.而粒子经过多次散射后可能被接收到,这种多次散射情况会对透过率产生贡献,却不能被 Lambert-Beer 定律计算得出.

依次将 3.2 和 3.3 节的结果与 Lambert-Beer 定律计算的结果进行比较.选择与 3.2 节中相同的条件,基于 Lambert-Beer 定律,计算三种辐射波在平流雾和辐射雾中的透过率  $T_{\text{LB}}$ ,并与 Monte Carlo 仿真的透过率  $T_{\text{MC}}$  进行比较,结果如图 7 所示,纵坐标  $\text{Difference value} = T_{\text{MC}} - T_{\text{LB}}$ .

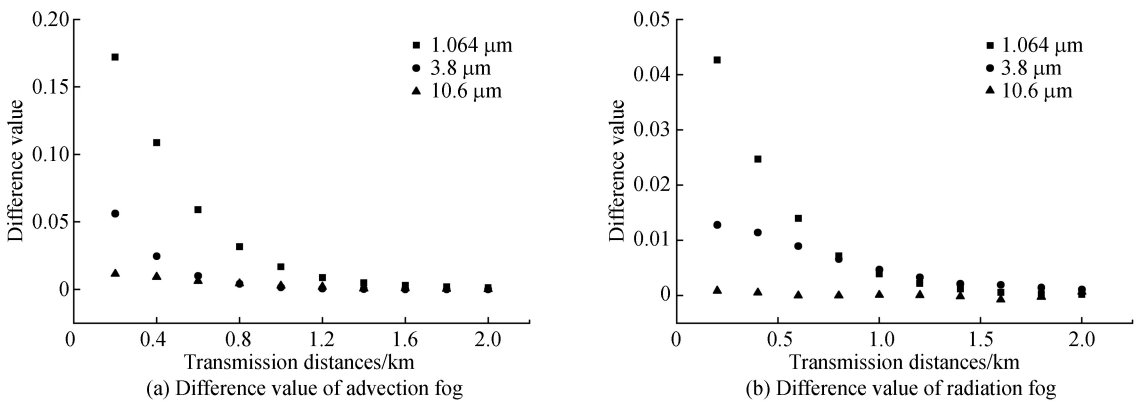


图 7 不同传输距离下, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果比较

Fig.7 Comparison of Monte Carlo and Lambert-Beer calculation results under different transmission distances

由图 7 可知,当能见度为  $1\ \text{km}$  时,传输距离由  $0.2\ \text{km}$  至  $2\ \text{km}$  逐渐增加的过程中, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果的差值逐渐减小.这是因为随着传输距离的增加,光子与雾滴粒子的碰撞次数增多,而每碰撞一次就要判断光子是被吸收还是散射.由于光子被吸收或溢出接收范围的可能性增加,多次散射现象虽然因传输距离的增加而增加,但从整体上看光子经过多次散射后与单次散射产生的效果基本相同,多次散射对透过率的贡献随着传输距离的增加而减小,所以 Monte Carlo 的计算结果逐渐趋于 Lambert-Beer 的计算结果.且传输距离较小时, $1.064\ \mu\text{m}$  在平流雾中的差值较为明显.说明此时的多次散射对透过率的贡献较大,这与 3.2 节中的分析结果相吻合.

在传输距离为  $0.2\sim 0.8\ \text{km}$  时,平流雾和辐射雾中的三波段的差值由大到小排序,依次是  $1.064\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$  和  $10.6\ \mu\text{m}$ .虽然由表 1 可知在平流雾中  $3.8\ \mu\text{m}$  的散射系数大于  $1.064\ \mu\text{m}$ ,但由图 3 可知在平流雾中  $1.064\ \mu\text{m}$  的前向散射能力较强,所以在平流雾中  $1.064\ \mu\text{m}$  的多次散射对透过率的贡献较多,使得平流雾中  $1.064\ \mu\text{m}$  的 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果的差值大于  $3.8\ \mu\text{m}$  的.相同波段下,平流雾中的差值大于辐射雾,这是因为由表 1、表 2 和图 3 可知,三波段在平流雾中的散射系数、前向的散射相位函数大于辐射雾中的散射系数、前向的散射相位函数. $10.6\ \mu\text{m}$  在两种雾中的散射能力和前向散射能力最弱,多次散射对其透过率的贡献十分小,所以  $10.6\ \mu\text{m}$  在两种雾中 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果的差值均非常小.



选择与 3.3 节中相同的条件,基于 Lambert-Beer 定律,计算三种辐射波在平流雾和辐射雾中的透过率  $T_{LB}$ ,并与 Monte Carlo 仿真的透过率  $T_{MC}$  进行比较,结果如图 8 所示。

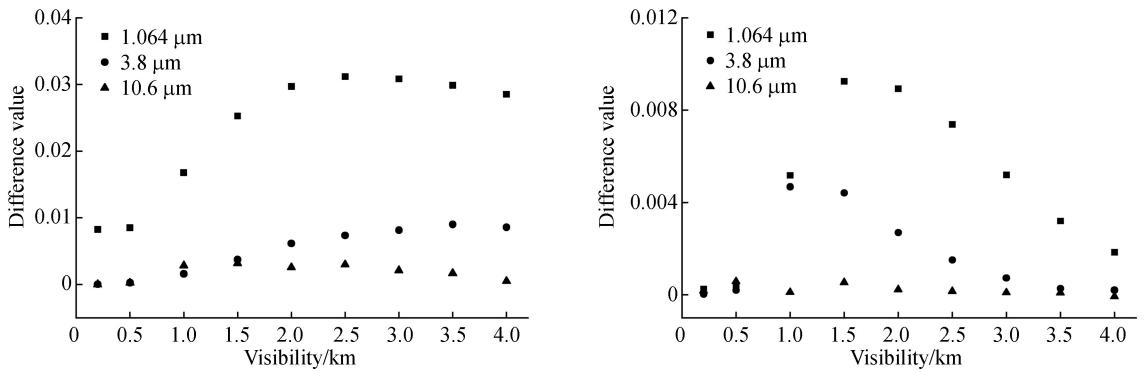


图 8 不同能见度下, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 计算结果比较

Fig.8 Comparison of Monte Carlo and Lambert-Beer calculation results under different visibility

由图 8(a)可知,在平流雾中  $1.064 \mu\text{m}$  的差值大于  $3.8 \mu\text{m}$  和  $10.6 \mu\text{m}$ ,这是由于  $1.064 \mu\text{m}$  相对于  $3.8 \mu\text{m}$  和  $10.6 \mu\text{m}$ ,具有较大的散射系数和前向散射能力.由图 8(b)可知,两种计算方法的最大差值在辐射雾中不超过 0.01,在辐射雾中三波段的散射系数和前向的散射相位函数均较小,多次散射对透过率造成的影响十分小。

由图 8 可知,当传输距离为 1 km 时,能见度由 0.2 km 至 4 km 逐渐增加的过程中, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 的计算结果的差值出现先增加后减小的情况.这是因为当雾的能见度很低时,雾滴粒子浓度较高,光子的多次散射现象虽然增多,但是光子碰撞次数的增加导致其被吸收或溢出接收范围的可能性也增加,此时许多光子的多次散射并未对透过率产生贡献,属于无效的多次散射,而当能见度逐渐增加时,光子的无效多次散射情况减少, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 的计算结果的差值开始增加.但是随着雾能见度的增加,雾滴粒子的浓度减少,光子的多次散射现象减少.随着能见度的不断增加,光子多次散射现象减少的情况渐渐成为主导因素,使得 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 的计算结果的差值开始减小.所以出现了随着能见度的增加, Monte Carlo 与 Lambert-Beer 的计算结果的差值先增加后减小的情况。

通过仿真也可知,当传输距离固定时,存在一个能见度使得此时 Monte Carlo 与 Lambert-Beer 的计算结果的差值最大,而能见度越大于或小于这个值时, Monte Carlo 的计算结果越来越趋近 Lambert-Beer 的计算结果.即能见度固定时存在一个传输距离,或传输距离固定时存在一个能见度,使得此时的多次散射对透过率的贡献最大。

## 4 结论

本文选择  $1.064 \mu\text{m}$ 、 $3.8 \mu\text{m}$  和  $10.6 \mu\text{m}$  三种辐射波,和平流雾和辐射雾两种介质,基于 Mie 散射理论,对雾的消光参量、多粒子散射相位函数进行了研究,并将结果作为 Monte Carlo 仿真的相关参量.基于 Monte Carlo 方法,对三种辐射波在平流雾和辐射雾中的传输进行了仿真,分析了其传输衰减特性,并将 Monte Carlo 的计算结果与 Lambert-Beer 定律的计算结果进行了对比.结果表明:1) Monte Carlo 仿真  $1.064 \mu\text{m}$  在平流雾中的传输时,应该特别考虑接收屏大小对透过率的影响;2) 在相同的传输距离和能见度下,  $1.064 \mu\text{m}$  在平流雾中的衰减小于  $3.8 \mu\text{m}$ ,在辐射雾中的衰减则大于  $3.8 \mu\text{m}$ ,  $10.6 \mu\text{m}$  在两种雾中均衰减较小,且在辐射雾中表现出良好的传输性;3) 对于散射能力较强、前向的散射相位函数值较大的粒子,多次散射对透过率的贡献较大,此时用 Monte Carlo 方法得到的透过率值更为准确;4) 传输距离固定时,会存在一个能见度使得此时的多次散射对透过率的贡献最大;能见度固定时,会存在一个传输距离使得此时的多次散射对透过率的贡献最大。

## 参考文献

- [1] WANG Yong-zhong. Modern military optics technology[M]. 1 rd. Beijing: Science Press, 2009.  
王永仲.现代军用光学技术[M].1版.科学出版社,2009.

- [2] YANG Jian-qin, LUO Ji-jun, XU Jun, *et al.* Visible light image enhancement based on experimental cabin under atmospheric environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(10): 239-245.  
杨建清, 罗积军, 徐军, 等. 基于大气环境实验方舱的可见光图像增强研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, **54**(10): 239-245.
- [3] FLECKER B, LEITGEB E, GEBHART M. Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links[J]. *Optical Engineering*, 2007, **18**(46): 1077-1083.
- [4] IJAZ M, GHASSEMLOOY Z, PESEK J, *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.
- [5] HAEFFELIN M, LAFFINEUR Q, BRAVOARANDA J A, *et al.* Radiation fog formation alerts using attenuated backscatter power from automatic lidars and ceilometers[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(11): 5347-5365.
- [6] DUAN Ya-bo, SONG Cheng-tian. Influence of atmospheric aerosol backscattering on incoherent frequency modulation continuous-wave laser ranging in the fog[J]. *Engineering Letters*, 2017, **25**(01): 15-21.
- [7] WEI Hao-ming, ZHAO Wei, DAI Xing-can. Influence of fog and aerosol particles' forward-scattering on light extinction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(6): 1355-1361.  
魏昊明, 赵威, 戴星灿. 雾和气溶胶前向散射对消光的影响[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(6): 1355-1361.
- [8] PENG P, LI C. Visibility measurements using two-angle forward scattering by liquid droplets[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(15): 3903-3908
- [9] TONG Guang-de, WANG Zhan-shan, SHEN Zheng-xiang, *et al.* Laser multiple scattering simulation for fog with closed distance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8): 0829001.  
童广德, 王占山, 沈正祥, 等. 近距离雾的激光多次散射模拟[J]. 光子学报, 2017, **46**(8): 0829001.
- [10] LAAN J D V D, WRIGHT J B, KEMME S A, *et al.* Scrymgeour. Superior signal persistence of circularly polarized light in polydisperse, real-world fog environments[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(19): 5464-5473.
- [11] GRABNER M, KVICERA V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(3): 513-520.
- [12] STILLWELL R A, PILEWSKIE P, THAYER J P, *et al.* Monte Carlo method for the analysis of laser safety for a high-powered lidar system under different atmospheric conditions[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, **29**(2): 022002.
- [13] ZHANG Ze-yu, XIE Xiao-ping, DUAN Tao, *et al.* Numerical calculation of 3.8  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$  laser radiation transmission characteristic under foggy condition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(S1): 42-47.  
张泽宇, 谢小平, 段弢, 等. 3.8  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  激光辐射在雾中传输特性的数值计算[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(S1): 42-47.
- [14] ZHANG Shuo, PU Jin-yun, LI Dong-zhen, *et al.* Monte-Carlo simulation water fogs and for the infrared radiation attenuation the analysis for transmission field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512004.  
张硕, 浦金云, 李东臻, 等. 细水雾遮蔽红外辐射的蒙特卡洛模拟及透射场分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0512004.
- [15] DING Jue, LI Jia-hua, QIU Xiao, *et al.* Numerical study on dynamics effect and radiation transfer characteristics of atmospheric particle by monte carlo method[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, **48**(3): 557-565.  
丁珏, 李家骅, 邱晓, 等. 蒙特卡洛方法数值研究大气颗粒物动力学效应和辐射传输性质[J]. 力学学报, 2016, **48**(3): 557-565.
- [16] WANG Rong-rong, WU Zhen-sen, ZHANG Yan-yan, *et al.* Transmission characteristics for THz and infrared waves in fog[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1001001.  
王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 雾天气中 THz 与红外的传输特性[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1001001.
- [17] LIN Yong, XU Zhi-yong, WANG Jing-yuan, *et al.* Optimization of link analysis for non-line-of-sight atmospheric scattering communication in fog weather[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(2): 705-710.  
林勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾环境下非视距散射光通信最佳链路分析[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(2): 705-710.
- [18] RAO Rui-zhong. Modern atmospheric optics[M]. 1rd. Beijing: Science Press, 2012: 219-235.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 1版. 北京: 科学出版社, 2012: 219-235.
- [19] ZHAO Zhen-wei, WU Zhen-sen, SHEN Guang-de, *et al.* Attenuation due to fog for 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, **21**(2): 95-98.  
赵振维, 吴振森, 沈广德, 等. 雾对 10.6  $\mu\text{m}$  红外辐射的衰减特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(2): 95-98.
- [20] YANG Jian-qing, LUO Ji-jun, XU Jun, *et al.* Study on near infrared radiation attenuation based on distribution database of raindrops[J]. *Laser Technology*, 2018, **42**(2): 161-165.  
杨建清, 罗积军, 徐军, 等. 基于雨滴谱分布数据库的近红外辐射衰减研究[J]. 激光技术, 2018, **42**(2): 161-165.

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 61701505), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2018JQ6080).

引用格式: WANG Ting, XU Jun, ZHAO Xuan-ke, *et al.* Simulation and Analysis of Infrared Radiation Transmission in Fog Based on Monte Carlo Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1201001

王婷, 徐军, 赵选科, 等. 基于 Monte Carlo 方法的雾红外传输仿真及分析[J]. 光子学报, 2018, **47**(12): 1201001