

文章编号: 1672-8785(2014)09-0037-06

1.064 μm 脉冲激光在雾中传输的 蒙特卡洛模拟

董飞彪 林文斌

(西南交通大学电磁场与微波技术研究所, 四川成都 610031)

摘 要: 在大气无线光通信中, 大气中的雾滴会导致激光信号严重衰减, 从而使得脉冲信号的时间展宽和能量衰减。应用蒙特卡洛多次散射模型对 1.064 μm 激光脉冲在雾中的传输特性进行了数值模拟。在模拟中, 基于米氏散射理论, 计算出了光在不同雾能见度下的散射相函数值, 并通过随机抽样方法得到了随机数与散射角的对应关系。与采用 H-G 相函数近似表示粒子对光的米氏散射特性的方法相比, 这种方法更精确。在此基础上, 模拟了不同雾环境和接收视场角下激光信号的脉冲响应特性。

关键词: 光通信; 相函数; 蒙特卡洛; 脉冲响应

中图分类号: O242 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.008

Monte Carlo Simulation of Propagation of 1.064 μm Laser Pulse in Fog

DONG Fei-Biao, LIN Wen-Bin

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In atmospheric wireless optical communication, the droplets in atmosphere may cause laser signals to attenuate severely, thus resulting in the attenuation of the temporal spread and energy of pulse signals. A Monte Carlo method is used to simulate the transmission of 1.064 μm laser pulses in fog. In the simulation, the scattering phase function values of light in the fog with different visibility are calculated according to the Mie scattering theory. The corresponding relation between the random number and the scattering angle is obtained through random sampling. Compared with the method in which the H-G phase function is used to represent the Mie scattering characteristics of particles to light approximately, this method is more accurate. On this basis, the impulse response characteristics of laser signals at different receiving view angles under different fog environment are simulated.

Key words: optical communication; phase function; Monte Carlo method; impulse response

0 引言

近年来, 随着激光技术的发展, 激光雷达、制导以及通信在国家安全防御等领域方面发挥

着越来越重要的作用。无线激光通信技术因通信容量大、保密性好和成本低等优点, 在太空卫星间通信和军事通信领域得到了广泛的应用。在无线激光传输系统中, 大气信道链路的功率

收稿日期: 2014-07-02

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NECT-10-0702)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(批准号: 2013CB328904)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110184110016)

作者简介: 董飞彪(1990-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事计算电磁学、阵列天线综合方面的研究。

E-mail: 727906321@qq.com

预算和整体性能受自由空间的衰减影响较大。大气中的气体分子、气溶胶粒子、湍流和云雨雾等天气因素会使传输激光严重衰减^[1,2],导致通信质量降低。本文主要讨论由雾滴粒子对激光的多重散射和吸收造成的信号脉冲响应。

在应用蒙特卡洛方法模拟光在随机分布介质中的传输特性时,人们常用 H-G^[3] 相函数及改进后的相函数来近似地代替米氏相函数。但这种近似与实际光散射能量分布规律的差别比较大。红外光波段激光在能见度较低的雾环境下,会与雾滴发生较强的米氏散射作用。我们利用米氏散射理论分析雾滴粒子对 1.064 μm 光波的散射和吸收特性,计算出不同能见度下雾滴粒子对光的散射相函数分布,然后通过随机抽样的方法确定随机数和散射角分布的关系。在此基础上,我们应用蒙特卡洛方法,对在不同雾环境和接收视场角下激光信号的脉冲响应特性进行模拟研究。

1 雾滴粒径的分布特性

根据雾的形成机理,可以把雾分为平流雾和辐射雾两大类。大气中雾滴粒子的尺寸分布会受天气、地区和时间等因素的影响。常用的伽马雾滴粒径分布模型为^[4]

$$n(r) = ar^2 \exp(-br) \quad (1)$$

式中, $n(r)$ 表示单位体积、单位半径间隔内的雾滴数。参数 a 、 b 与能见度 $V(\text{km})$ 和含水量 $W(\text{g}/\text{m}^3)$ 有关。若半径 r 的单位为 m , 则有^[5]

$$a = \frac{9.781}{V^6 W^5} \times 10^{15} \quad b = \frac{1.304}{VW} \times 10^4 \quad (2)$$

根据平流雾和辐射雾的含水量与能见度的关系,不同雾环境下粒径分布与能见度的关系可表示为^[6]

平流雾:

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \exp(-0.8359 V^{0.43} r) \quad (3)$$

辐射雾:

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \exp(-4.122 V^{0.54} r) \quad (4)$$

式中, 粒子半径的单位为 μm , $n(r)$ 的单位为 $\text{m}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 。模式半径与能见度有如下关系:

$$\text{辐射雾: } r_0 = 0.4853 V^{-0.54} (\mu\text{m})$$

$$\text{平流雾: } r_0 = 2.392 V^{-0.43} (\mu\text{m})$$

当红外光波在雾环境中传输时,它会与雾滴粒子发生相互作用。由于红外波长与雾滴粒子的尺寸相当,且大气分子的瑞利散射对近红外光信号的损耗可以忽略不计^[7],因此雾滴对 1.064 μm 激光的散射作用主要体现在米氏散射上。米氏散射光强在各个角度内的分布不同,通常用散射相函数 $P(\theta)$ 来表示光强与散射角 θ 之间的关系。散射相函数 $P(\theta)$ 定义为光在某个方向单位立体角的散射光能量与所有方向单位立体角内的平均散射能量的比值。经抽样得到

$$\xi_\theta = 2\pi \int_0^{\theta_s} p(\theta) \sin\theta d\theta \quad (5)$$

式中, θ_s 是散射角, ξ_θ 是 $[0,1]$ 区间的均匀分布随机数。

现根据米氏散射理论来计算不同辐射雾能见度(即不同的粒子尺度参数)下雾滴粒子对 1.064 μm 光的散射和吸收系数。雾滴粒子对红外激光的复折射取为 $n_2 = 1.327 - 2.89 \times 10^{-6}i$ 。

计算得到的散射和吸收系数以及非对称因子 g 与雾能见度 V 之间的关系见表 1。

在研究大气辐射传输特性时,人们常使用的离散坐标法和蒙特卡洛方法都需要粒子的散射相函数^[8,9]。目前常用的计算相函数的方法有勒让德多项式展开法和 H-G 相函数近似法,前者主要应用于求解辐射传输方程的离散坐标法,但其展开系数难以求解,后者因表达形式简单、具有可解析积分求逆的性质,易于求出随机数与散射角分布的关系,因而在蒙特卡洛方法中被广泛地用于解决关于散射角分布抽样的问题。但该近似方法并不能在所有角度内都准确地反映散射角的分布规律。图 1 给出了不同条件下米氏相函数和 H-G 相函数的角分布的比较。从图中可以看出,在不同雾环境下,米氏相函数在不同角度内起伏较大,直接使用米氏相函数更加符合雾滴粒子的散射特性。为了得到散射角

和随机数的关系, 在 $[0, \pi]$ 角度范围内取 n 个离散点, 并使这些点的离散相函数值满足归一化条件:

$$2\pi \sum P_m(\theta_m) \sin \theta_m \Delta \theta_m = 1$$

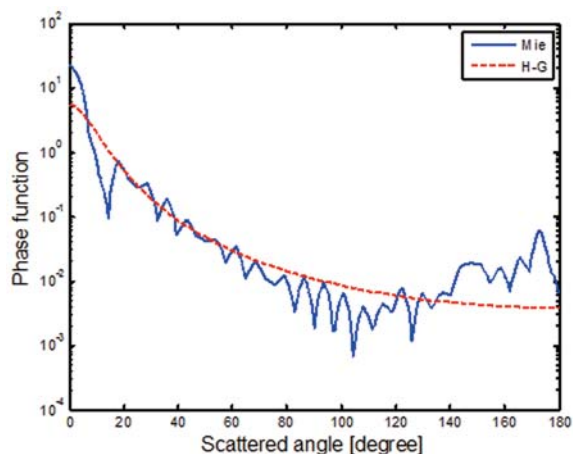
给定一个散射角 θ_i , 方程 (5) 的右边可以用

$s_i = 2\pi \sum_{m=1}^{m=i} P_m(\theta_m) \sin \theta_m \Delta \theta_m$ 来计算。因此, 对于一个处于 $[0, 1]$ 区间分布均匀的随机数 ξ_i , 可以根据式 (6) 来确定 θ_i :

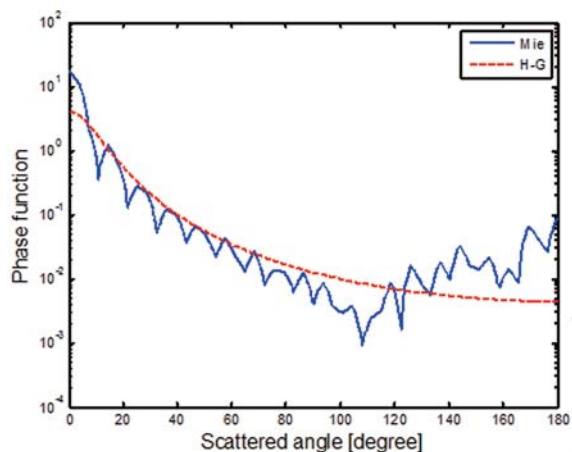
$$s_{i-1} < \xi_i \leq s_i \quad (6)$$

表 1 1.064 μm 激光在不同能见度下的散射和衰减系数

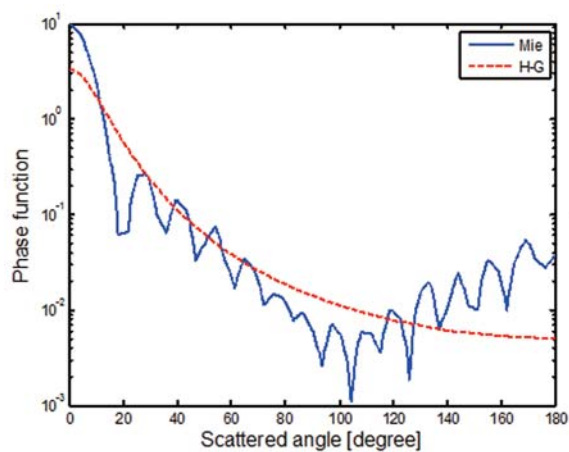
Visibility(km)	Scattering coefficient(m^{-1})	Attenuation coefficient(m^{-1})	g
0.02	0.070230	0.070240	0.8368
0.03	0.050590	0.050595	0.8125
0.05	0.030833	0.030835	0.7926
0.10	0.015125	0.015126	0.7157



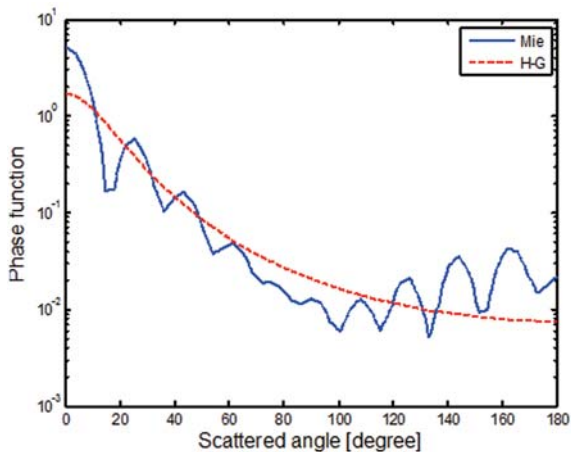
(a) $V=0.02 \text{ km}$



(b) $V = 0.03 \text{ km}$



(c) $V=0.05 \text{ km}$



(d) $V = 0.1 \text{ km}$

图 1 不同雾能见度下米氏相函数和 H-G 相函数的角分布

这样不需要对相函数作积分展开求逆运算即可得到随机数与散射角之间的对应关系。我们分别用本文的抽样方法和文献 [10] 中的式 (6) 确定了散射角和随机数之间的关系。模拟的结果如图 2 所示, 我们的结果与文献 [10] 的图 1(a) 符合得很好。

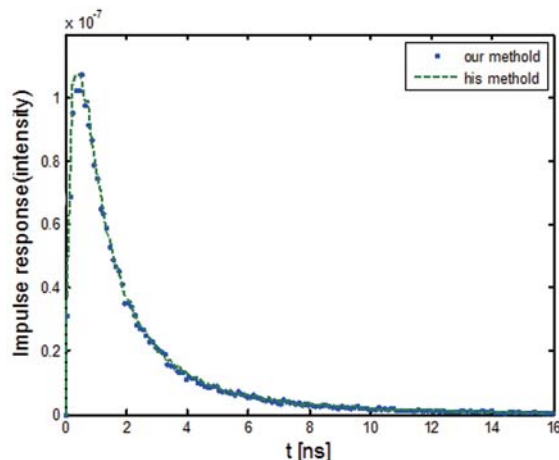


图 2 H-G 相函数下使用两种不同处理方法得到的模拟结果

2 蒙特卡洛计算模型

用蒙特卡洛方法模拟光子传输的基本思想是: 光子以一定的方向、权值和初始时间进入随机介质, 与粒子碰撞后实时给出下一次自由传输步长, 并对散射相函数进行抽样, 得到碰撞后新的运动方向。这个过程重复进行, 直至光子被探测器接收或权值低于某一阈值为止 [11]。

光子运动状态用空间位置 (x,y,z) 、运动方向 (θ,φ) 和光子权值 w 来表示, θ 和 φ 分别为散射角和方位角。对每个光子进行初始化, 初始权重 w 为 1, 所有光子的初始位置为 $(0,0,0)$ 。通过角度在光源发散角内均匀分布抽样得到初始方向, 初始时间由激光脉宽内均匀分布抽样确定。应用蒙特卡洛法对自由程进行抽样, 得到

$$l = \frac{-\ln \xi}{k_a + k_s} \quad (7)$$

式中, ξ 为 $(0,1)$ 之间均匀分布的随机数。 k_s 、 k_a 分别是粒子散射系数和吸收系数, 衰减系数 $k = k_a + k_s$ 。步长 l 确定后, 由光子的当前位置

(x,y,z) 和传输方向 (μ_x, μ_y, μ_z) 确定光子下一碰撞点的位置 (x', y', z') :

$$\begin{cases} x' = x + \mu_x l \\ y' = y + \mu_y l \\ z' = z + \mu_z l \end{cases} \quad (8)$$

同时光子移动一个步长后, 能量被部分吸收, 权值减小, 光子权重变为

$$w' = w(1 - \frac{k_a}{k_s + k_a}) \quad (9)$$

光子与粒子碰撞后, 其空间散射角 θ 可通过对散射相函数抽样得到, 散射方位角在 $(0, 2\pi)$ 均匀分布, 抽样值 $\varphi = 2\pi\xi$ 。通过坐标变换得到光子碰撞后在全局坐标系中的新的方向余弦 [12]。

对光子的终止判定是, 光子是否到达接收面或光子权值是否小于某一阈值, 本文中此阈值取为 10^{-4} 。接收面位于垂直于 z 轴上时, 只有落入一定口径范围内的接收面的光子才被作为探测到的光子, 本文要求只有到达接收面且天顶角小于接收视场角的一半的光子才能作为探测到的光子。同时记录每个接收光子的位置、方向、传输时间和权值, 并根据传输时间划分统计区间, 得到每段区间内光子权重之后与总的发射光子权重的比值即信道脉冲响应。

3 计算结果和分析

采用的光源是 $1.064\mu\text{m}$ 的 δ 脉冲激光, 接收器位于垂直于光传输方向, 口径取为 50 cm 。光子初始方向为 $(0,0,1)$, 光脉冲响应起始时间均平移到零点位置。首先, 比较用不同的相函数模拟得到的结果。图 3 给出了当接收视场角为 180° 、 $L = 100\text{ m}$ 时, 分别使用米氏相函数和 H-G 相函数所得到的激光脉冲在不同雾能见度下的脉冲响应。从图中可以看出, 当采用 H-G 相函数近似时, 其脉冲响应与使用米氏相函数的模拟结果差别较大, 主要表现在响应波形衰减和激光脉冲产生的时间展宽上, 因此使用 H-G 相函数的近似结果不符合实际光在雾中传输的脉冲响应特性。

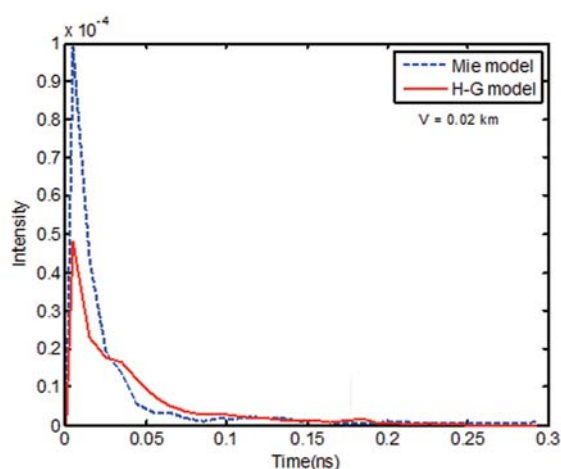
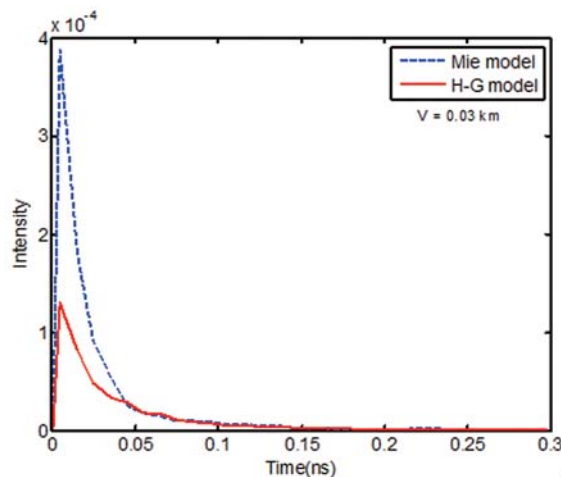
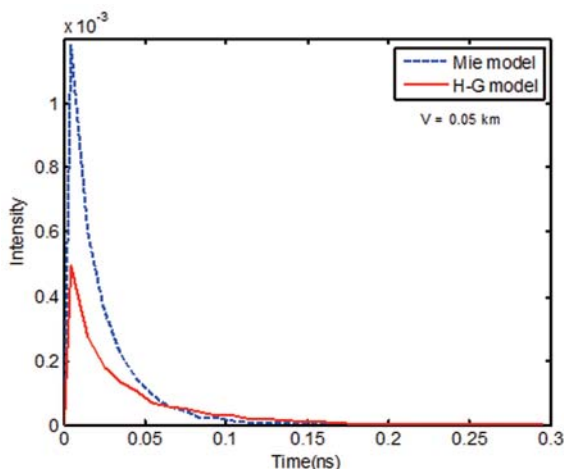
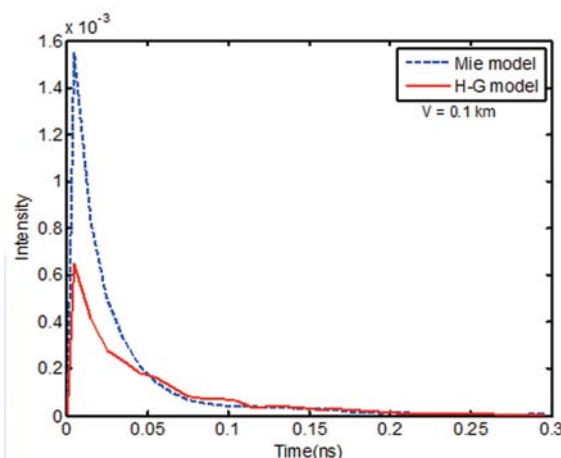
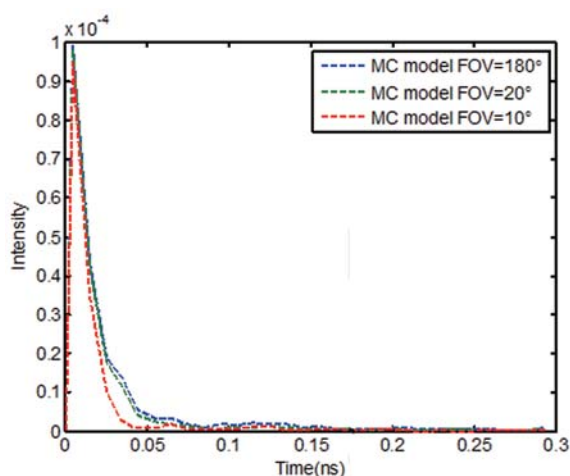
(a) $V=0.02$ km(b) $V = 0.03$ km(c) $V=0.05$ km(d) $V = 0.1$ km

图 3 基于不同相函数计算得到的激光脉冲时间响应比较

最后, 我们将离散米氏散射相函数值应用到蒙特卡洛多次散射模型中, 模拟在不同雾能见度和接收视场角下激光信号的脉冲响应特性。图 4 给出了传输距离 $L = 100$ m, 能见度分别为 0.02 km、0.03 km、0.05 km 和 0.1 km, 接收视场角分别为 180° 、 20° 和 10° 时激光信号的脉冲响应。可以看出, 当光信号在能见度较大的雾环境中传输时, 传输光子与雾滴粒子的碰撞次数增加, 雾对激光信号的衰减增大。在相同的雾环境下, 随着接收视场角的增大, 探测器能接收到散射次数更多的光子, 因此信号脉冲的展宽特性就越明显。

(a) $V=0.02$ km

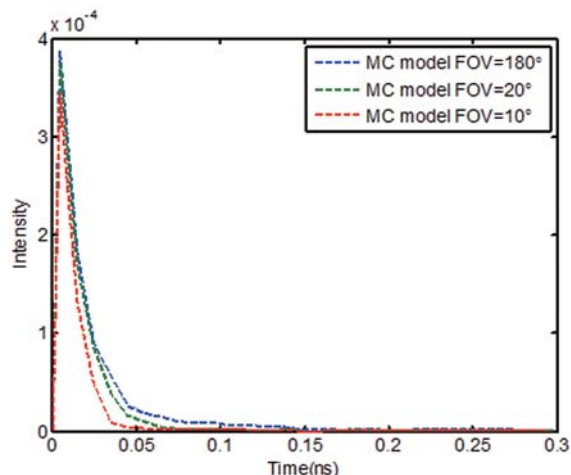
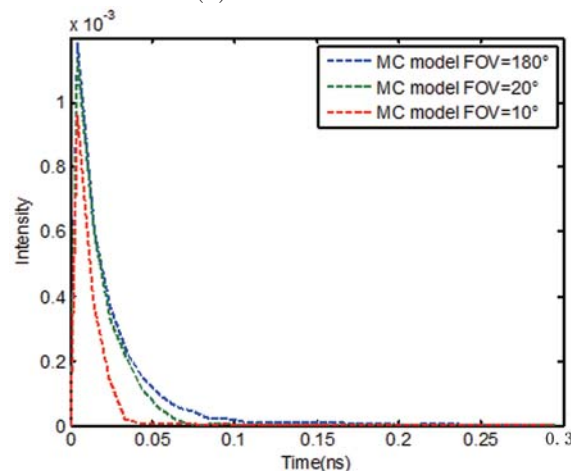
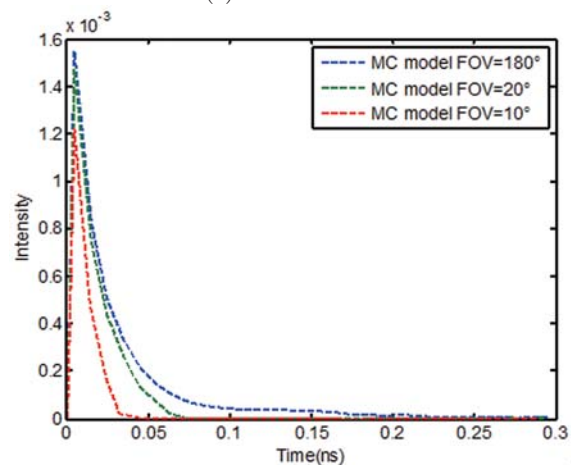
(b) $V = 0.03 \text{ km}$ (c) $V = 0.05 \text{ km}$ (d) $V = 0.1 \text{ km}$

图 4 不同雾环境下的激光脉冲响应

4 结论

应用蒙特卡洛多次散射模型模拟了不同条件下 $1.064 \mu\text{m}$ 激光在雾中传输的脉冲响应特性。

散射相函数是蒙特卡洛方法求解粒子运输中抽样散射方向的重要基础,相函数值会直接影响相关计算的精确性。在应用蒙特卡洛方法模拟光在雾环境中的传输时,不再使用常用的 H-G 相函数或改进的相函数来近似代替米氏相函数,而是通过随机抽样方法直接使用基于米氏散射理论计算出的离散相函数值。在此基础上,应用蒙特卡洛多次散射模型模拟了不同条件下激光信号在雾中传输的脉冲响应特性。

参考文献

- [1] Rensch D B, Long R K. Comparative Studies of Extinction and Backscattering by Aerosols, Fog and Rain at $10.6\mu\text{m}$ and $0.63\mu\text{m}$ [J]. *Applied Optics*, 1970,9(7): 1563-1573.
- [2] 宋方正. 应用大气光学基础 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [3] Binzoni T, Leung T S, Grandjbakhche A H, et al. The Use of the Henyey-Greenstein Phase Function in Monte Carlo Simulation in Biomedical Optics [J]. *Phys Med Biol*, 2006,51(17): 313-322.
- [4] 赵振维, 林乐科, 董庆生, 等. 雾的雷达后向散射特性研究 [J]. *电波科学学报*, 2001,16(4): 498-502
- [5] Zhao Z W, Wu Z S. Millimeter Wave Attenuation Due to Fog and Clouds [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000,21(10): 1607-1614.
- [6] 柯熙政, 马冬冬, 刘佳妮. 激光在雾中传输的衰减研究 [J]. *光散射学报*, 2009,21(2): 104-109.
- [7] Hulst H C. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Dover Publication, 1981: 330-350.
- [8] Lathrop K D. Use of Discrete-ordinates Methods for Solution of Photon Transport Problems [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1966, 24(4): 381-388.
- [9] 黄朝军, 刘亚锋, 吴振森, 等. 烟尘中电磁波传输特性的 Monte Carlo 模拟 [J]. *物理学报*, 2009,58(4): 2397-2402
- [10] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. On Impulse Response for Underwater Wireless Optical Communication Links [C]. In *Proc. 2013 IEEE/MTS OCEANS Conf*, 2013: 1-4.
- [11] Berrocal E, Jermy M, Meglinski I V. New Monte Carlo Model of Laser Radiation Propagation in Sprays, Aerosols and Other Complex Polydisperse Turbid Media [C]. *SPIE*, 2006, 6163: 1-4.
- [12] Prah S A, Keijzer M, Jacques S L, et al. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue [C]. *SPIE Proceedings*, 1989, IS 5: 102-111.