

doi:10.3788/gzxb20184710.1028002

侧向散射激光雷达的蒙特卡罗仿真与实验研究

冯冰¹, 胡森^{1,2}, 李鹏^{2,3}, 韩宁¹, 金涛¹, 欧军¹,
周雪芳¹, 杨国伟¹, 卢旻¹, 毕美华¹

(1 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)
(2 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)
(3 防化研究院, 北京 102205)

摘 要:利用半解析蒙特卡罗方法建立了侧向散射激光雷达的理论模型.根据理论模型研究了多次散射条件下,大气气溶胶对激光雷达光束的侧向散射机制.通过对理论模型的仿真,得到了侧向散射光子的空间分布规律,获得了侧向散射光强和散射系数曲线.比对了能见度分别为 5.7 km, 8.0 km, 10.2 km 的实验大气条件下仿真与实验获取的散射系数曲线,发现当模型中大气平均散射因子和非对称因子(μ_s , g)分别为(0.7, 0.65), (0.45, 0.45)和(0.2, 0.35)时,仿真与实验的拟合优度优于 95%.

关键词:蒙特卡罗模拟;平均散射因子;非对称因子;大气光学;多次散射

中图分类号:TN012

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1028002-8

Monte Carlo Simulation and Experimental Study of Side-Scattered Lidar Echo Signals

FENG Bing¹, HU Miao^{1,2}, LI Peng^{2,3}, HAN Ning¹, JIN Tao¹, OU Jun¹,
ZHOU Xue-fang¹, YANG Guo-wei¹, LU Yang¹, BI Mei-hua¹

(1 College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)
(2 State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)
(3 Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: A theoretical model of the side-scattering lidar is established by semi-analytical Monte Carlo method. In the model, the side-scattering mechanism of the laser beam on the atmospheric aerosol is studied under multiple-scattering conditions. Through the theoretical simulation of the model, the spatial distribution of the side-scattered photons as well as the side-scattering intensity and the scattering coefficient curves are obtained. Comparing the scattering coefficient curves obtained by experiments and simulations under visibility conditions of 5.7 km, 8 km and 10.2 km, it is found that with the average scattering factor and the asymmetric factor (μ_s , g) at (0.7, 0.65), (0.45, 0.45) and (0.2, 0.35), the fit goodness is better than 95%.

Key words: Monte Carlo simulation; Average scattering factor; Asymmetric factor; Atmospheric optics; Multiple scattering

OCIS Codes: 280.3640; 010.1290; 010.1310; 290.4210; 290.4020

0 引言

激光雷达是一种用于大气气溶胶参数探测的简单、有效且可靠的手段.激光雷达在大气气溶胶参数的实时探测、探测分辨率和探测精度等方面均具有优势^[1-3].后向散射激光雷达是一种探测高空大气气溶胶参数

基金项目:国家自然科学基金(No.61705055)和国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(No.SKLNBC2015G03)资助

第一作者:冯冰(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达大气探测. Email:13588871947@163.com

导师(通讯作者):胡森(1982-),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达研制及激光雷达探测. Email:miao_hu@foxmail.com

收稿日期:2018-06-07;录用日期:2018-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

强有力的工具,但由于几何因子的存在,在近地面存在探测盲区,所以限制了后向散射激光雷达在近地面的探测精度^[4].侧向散射激光雷达避免了几何因子的影响,在近地面具有很高的空间分辨率^[5],适合近地面大气气溶胶参数的探测.孟祥谦^[6]等利用侧向散射激光雷达装置测量了大气气溶胶在水平方向上的散射灰度值角分布,计算了水平方向的散射相函数,其理论依据主要是单次 Mie 散射原理.在大气气溶胶的 Mie 散射过程中,随着光学厚度的增加,多次散射的影响越来越大,回波信号变得十分复杂,因此有必要考虑多次散射作用^[7-9].蒙特卡罗方法是解决激光在复杂几何形状和非均匀介质条件下多次散射传输问题的重要方法,且在数学方面的运算相对简单^[10-11].蒙特卡罗方法可以在光子随机运动轨迹计算的基础上,模拟激光在散射介质中传播的整个物理过程;还可以模拟激光雷达在各种不同情况下的发射器和光子探测器特性、介质边界条件以及介质散射特性,通过跟踪大量的光子轨迹来得到模拟结果^[12-14].张育真等利用半解析的蒙特卡罗方法模拟了不同参数条件下激光雷达的回波信号,但是模拟针对的是后向散射过程^[15].

基于前文所述的侧向散射激光雷达在近地面测量的优势,本文采用半解析蒙特卡罗方法建立侧向散射激光雷达的理论模型,并对其侧向散射机制进行仿真.其次,进一步搭建侧向散射激光雷达实验平台,将获取的实验与仿真结果进行比对.最后,通过分析散射光强和散射系数的分布情况,判断理论模型参数与大气环境之间存在的联系.

1 CCD 侧向散射激光雷达的蒙特卡罗理论模型

在建立侧向散射激光雷达的蒙特卡罗理论模型之前,首先需要建立散射介质模型.考虑实际出射的激光束为高斯基模光束,激光发散半角为 θ_{ed} ,建立了如图 1 所示的圆台状散射介质.上底面半径为 r_1 ,下底面半径为 r_2 ,长度为 L ,介质内、外部折射率均为 1.散射介质下方放置一个长为 $2a$,宽为 $2b$,中心点 M 坐标为 $(0, M_a, M_b)$ 的光子探测器,用来检测逃逸出来的光子,并将探测器沿 z 方向分割为 n 个条块用来确定光子落下的位置,光子探测器与散射介质外表面的距离为 D .

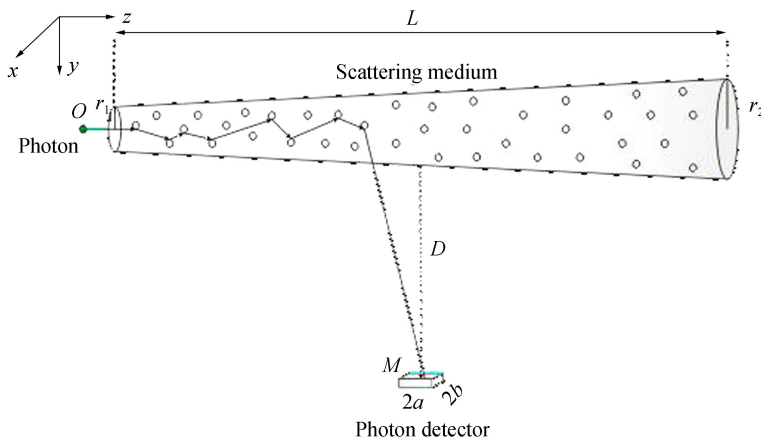


图 1 光子多次散射仿真模型

Fig.1 The simulation model of the photon multiple scattering

光子运动轨迹模拟:建立如图 1 中所示的直角坐标系,光子在起点 O 处进行传输,经过圆台状散射介质随机地发生散射和吸收.光子初始位置坐标为 $(0, 0, 0)$,初始方向余弦为 $(0, 0, 1)$,入射光子的初始权重 W_0 为 1,光子发生散射后的运动方向由当前位置方向余弦确定.利用蒙特卡罗方法光子的运动步长 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{-\ln \xi_1}{\mu_s + \mu_a} \quad (1)$$

式中, ξ_1 为 $(0, 1)$ 之间的随机数, μ_s, μ_a 分别为平均散射因子和平均吸收因子.光子发生散射的概率为

$$P = \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} \quad (2)$$

光子发生散射的位置 (X_1, Y_1, Z_1) 为

$$\begin{cases} X_1 = X + \Delta L \times \mu_x \\ Y_1 = Y + \Delta L \times \mu_y \\ Z_1 = Z + \Delta L \times \mu_z \end{cases} \quad (3)$$

式中, (X, Y, Z) 为光子发生散射时前一次位置的坐标, (μ_x, μ_y, μ_z) 为光子到达当前位置时的方向余弦, 根据 Mie 散射理论当前位置发生散射后方向余弦 $(\mu_{x1}, \mu_{y1}, \mu_{z1})$ 为

$$\begin{cases} \mu_{x1} = \frac{\sin \theta (\mu_x \mu_z \sin \varphi + \mu_y \cos \varphi)}{(1 - \mu_z^2)^{\frac{1}{2}}} + \mu_x \cos \theta \\ \mu_{y1} = \frac{\sin \theta (\mu_y \mu_z \sin \varphi - \mu_x \cos \varphi)}{(1 - \mu_z^2)^{\frac{1}{2}}} + \mu_y \cos \theta \\ \mu_{z1} = \frac{-\sin \theta \cos \varphi}{(1 - \mu_z^2)^{\frac{1}{2}}} + \mu_z \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, φ 为散射方位角且 $\varphi \in (0, 2\pi)$, θ 为散射偏转角且 $\theta \in (0, \pi)$.

$$\varphi = 2\pi\xi_2 \quad (5)$$

式中, ξ_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数, 为减少运算的复杂度, 选择半解析蒙特卡罗方法, 使用 Henyey-Greenstein^[16] 表达式近似取代散射相位函数, 因此散射角 θ 近似为

$$\theta = \begin{cases} \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi_3} \right)^2 \right] \right\}, g \neq 0 \\ \arccos(2\xi_4 - 1), g = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, ξ_3, ξ_4 均为 $(0, 1)$ 的随机数, g 为非对称因子, 表示光子对于单个颗粒物散射余弦角的平均值. 光子第 N 次散射权重 W_n 为

$$W_n = \frac{W_{n-1}\mu_s}{\mu_a + \mu_s} \quad (7)$$

光子被光子检测器检测区域接收的判定为: 通过光子与圆台散射介质中心线的距离, 判断光子是否要逃离出散射介质; 若光子在这次碰撞后即将逃离出圆台状散射介质, 计算光子的运动直线方程与光子检测器探测平面的交点坐标 (x_2, M_a, z_2) , 若 $|M_a - x_2| < b$ 且 $|z_2 - M_a| < a$ 则光子被接收, 并确定该光子落入光子检测器条块位置 k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$), 将不是垂直入射的光子的权重乘上入射角的余弦值作为其权重, 最后对具有相同 k 的光子的权重进行叠加.

侧向散射系数的模拟: 假设光子逃出散射介质时出射点为 z_{end} , 散射角为 θ_{end} , 假设在短距离内激光在传输中的损耗可以忽略不计, 则在 z_{end} 处侧向散射系数 $\beta(z_{\text{end}}, \theta_{\text{end}})$ ^[17] 和侧向散射光强 $I(z_{\text{end}}, \theta_{\text{end}})$ 的关系为

$$I(z_{\text{end}}, \theta_{\text{end}}) = \frac{KI_1 A \sin^2 \theta_{\text{end}}}{D^2} \beta(z_{\text{end}}, \theta_{\text{end}}) dz \quad (8)$$

式中, K 为系统接收效率常数, I_1 为激光器的出口功率, A 为聚焦镜头面积.

2 CCD 侧向散射激光雷达实验和仿真参数设计

图 2 为 CCD 侧向散射激光雷达实验装置. 装置使用 Nd:YAG/KTP 绿光激光器作为光子发射器, CCD 作为光子检测器, 在激光光轴方向侧方距离 40 cm 处放置 CCD, CCD 光轴与激光光轴垂直. 激光器发射功率为 $P = 500$ mW, 波长 $\lambda = 532$ nm, 束腰半径 $w_0 = 1$ mm. CCD 镜头为可调焦距镜头, 实验中设置 $F = 1.2$; 为进一步去除背景光, 在 CCD 与镜头间放置半高全宽为 10 nm 的 532 nm 窄带滤波片. CCD 靶面为 1/2 英寸, 分辨率为 768×574 像素, 像元大小为 $12.7 \mu\text{m} \times 9.8 \mu\text{m}$, CCD 的灵敏度为装配 $F1.4$ 镜头时在 $0.000 2 1\times$ 照度下输出 200 mA 的电流, CCD 帧频为 40 帧/秒. 实验时间选择在晴朗的夜晚, 地点为某建筑 10 楼楼顶, 当天的气象条件, 如能见度等根据当地气象台预报. 图 3 为某时刻实际测量的侧向散射激光雷达回波信号图.

为了与实验结果相对应, 通过实验参数设计仿真参数. 将总体初射光子数量设为 10^6 (光子数量差别引起被测参数的绝对值差异, 可以通过测量结果的归一化抵消), 光子的波长为 532 nm; 为了保证能充分散射, 将圆台散射介质上、下底面半径 r_1 和 r_2 均设置为相应激光光束宽度的 5 倍, 圆台长度设置为 $L = 1 250$ mm. 根据实验透镜成像比例以及 CCD 靶面尺寸计算出光子检测器有效区域 $2a = 6.4$ mm 和 $2b = 4.8$ mm, 光子检测器镜头距离圆台状介质的距离 $D = 400$ mm, 光子权重的阈值设置为 0.001, 系统接收效率常数 K 设为 0.8. 将 CCD 侧向散射激光雷达的实验结果和蒙特卡罗仿真计算结果归一化进行对比.

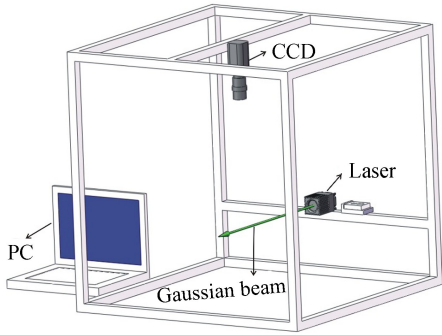


图2 基于 CCD 的侧向散射激光雷达装置
Fig.2 The CCD side-scattering lidar device

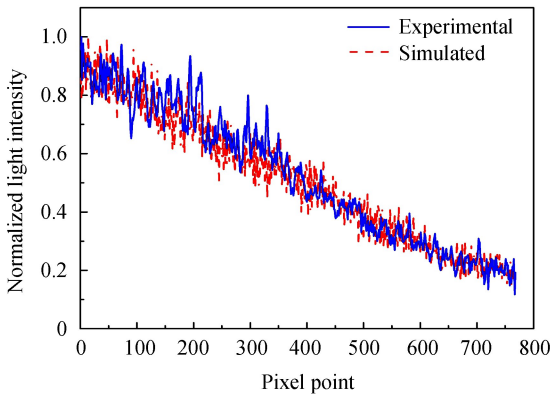


图3 CCD 侧向散射激光雷达回波信号图
Fig.3 The echo signal diagram based on the CCD side-scattering lidar

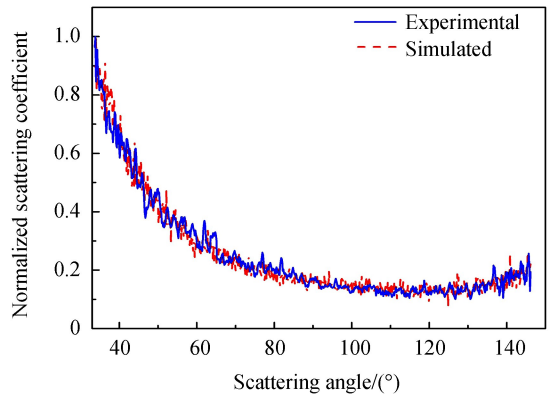
仿真过程中为了选取最接近大气条件的参数,需要对散射介质的仿真参数进行优化,主要是针对 μ_s 和 g . 具体在实验中,考虑到大气衰减系数 μ 可以通过大气能见度测量计算得到: 衰减系数 $\mu = \mu_s + \mu_a$, 即大气衰减是散射和吸收两者综合作用的结果. 由于晴朗天气下 μ_a 仅与激光波长有关系, 在实验过程中保持激光波长不变, μ_a 的变化可以忽略不计^[18-19]. 非对称因子 g 表征了大气气溶胶粒子散射各向异性的程度, 属于气溶胶的本质特性^[20]. 因此在仿真中通过改变 μ_s 和 g , 可以模拟光子在不同大气条件下的散射机制.

3 实验结果与仿真结果的对比分析

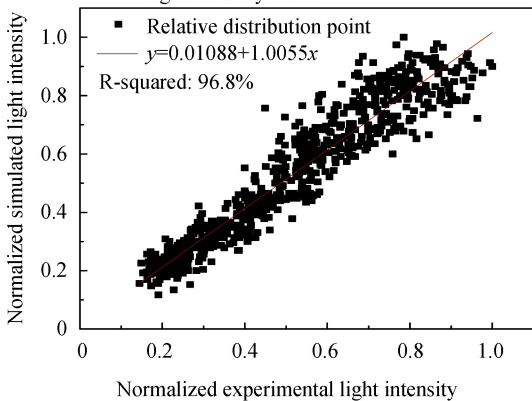
在 2018 年 1 月能见度为 5.7 km 的某天晴朗的夜晚, 在某建筑 10 楼楼顶进行了实验. 为了减少图像噪声, 使用 40 张图片的光强矩阵叠加取平均值对图像进行降噪; 然后令每一列的光强叠加, 将 768×574 的光强矩阵转化为 768 个元素的一维光强数组, 并利用式(8) 计算对应的散射系数曲线. 实验在某时刻 1 s 之内采集到了 40 幅回波信号图, 当天根据能见度计算得到的大气衰减系数为 0.69; 根据衰减系数和 μ_s 之间的关



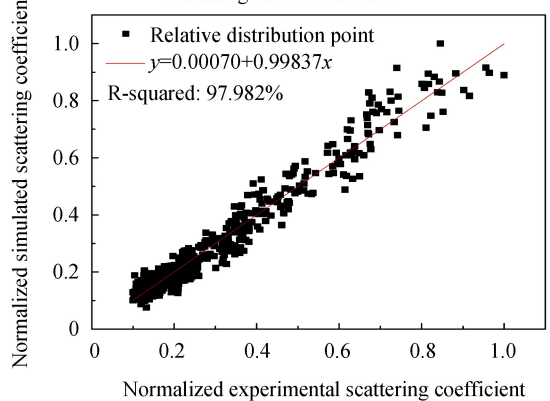
(a) Normalized experimental vs. simulated light intensity curve



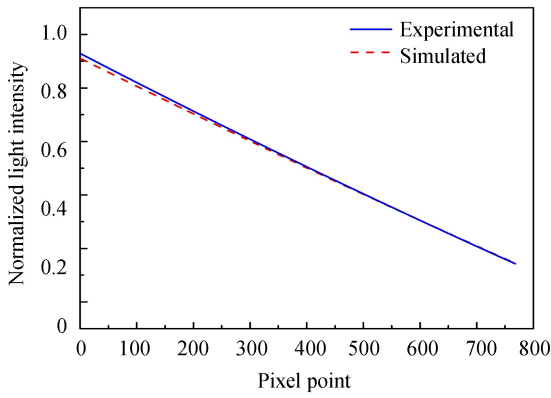
(b) Normalized experimental vs. simulated scattering coefficient curve



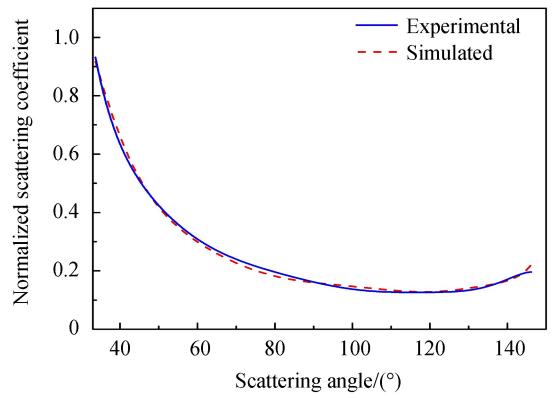
(c) The relationship between the experimental and simulated light intensity



(d) The relationship between the experimental and simulated scattering coefficient



(e) Denoising light intensity curve comparison chart



(f) Denoising scattering coefficient comparison chart

图4 实验与仿真的光强和散射系数曲线对比

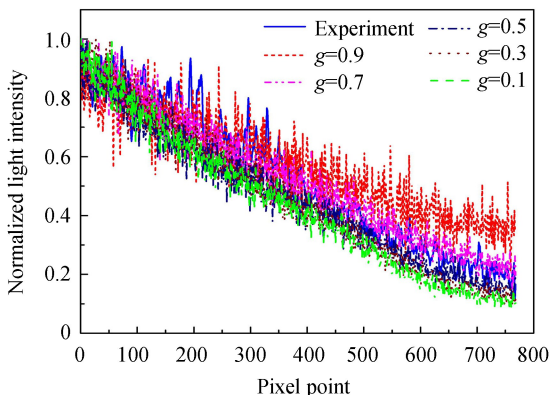
Fig.4 Comparison of experimental and simulated light intensity and scattering coefficient curves

系,在仿真过程中,通过将模型的 μ_s 微调,并且同时调节 g 使仿真与实验结果相吻合,最终将仿真参数确定为 $\mu_s=0.65, \mu_a=0.04, g=0.7$ 时,便得到如图4(a)、(b)所示的光强分布曲线和散射系数曲线的实验与仿真对比图。

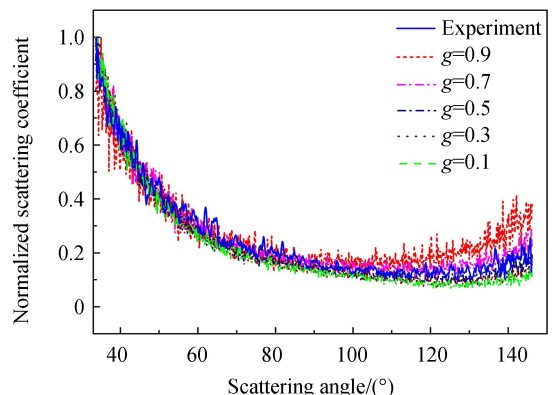
图4(a)中横坐标是 CCD 的像素点分布,纵坐标为归一化后的光强值,实线是实验获得的归一化光强曲线;虚线是仿真计算得到的归一化的光强曲线。图4(b)横坐标是散射角,纵坐标是经过归一化的散射系数,实线是根据实测光强曲线和式(8)反演出的散射系数曲线图,虚线是利用仿真光强曲线反演出的散射系数曲线图。图4(a)、(b)中实线和虚线重合度较高,部分区域如图4(a)在在 pixel200 和 pixel300 的偏离是因为实验过程中出现的大颗粒物浮尘的反射。图4(c)、(d)定量地说明了实验与仿真数据二者的相关程度。将实验和仿真数据分别设为 x 轴和 y 轴进行关系比较,图4(c)中实验与仿真的光强数据之间的线性关系为 $y=0.01088+1.0055x$,拟合优度为96.8%。图4(d)中实验与仿真的散射系数数据之间的线性关系为 $y=0.00070+0.99837x$,拟合优度为97.982%。说明仿真数据与实验数据具有很强的相关性。由于实验图和仿真图的噪声毛刺不利于对比,为了方便、直观地观察实验和仿真结果的趋势,将图4(a)、(b)数据去噪声处理后得到了如图4(e)、(f)所示的实验与仿真结果对比图。从图4(e)可以看出,随着传输距离 z 的增加整体光强曲线呈现下降的趋势;从图4(f)可以看出,当散射角在 120° 以内时,散射角增大散射系数减小,当散射角大于 120° 时,散射系数呈现了上升趋势。造成上述现象的原因包含两个方面:光子在散射介质中传输时,总光强的逐渐衰减导致光子检测器接收到的散射光强变弱;在 g 的影响下,大角度(偏向后向散射)和小角度(偏向前向散射)的散射系数相对于中等角度的散射系数更大,因此散射系数曲线在大角度时尾部会上翘(这种现象在 g 的绝对值较大时更为明显),此结果也与文献[17]的结论吻合。

在仿真过程中,相同能见度条件下,不同 g 的仿真结果也不尽相同。

图5(a)、(b)是不同 g 时光强与散射系数的实验和仿真曲线,其中实线是实验曲线,其他为仿真曲线。考虑到米散射过程中前向散射的比重较大,因此 g 取0.1,0.3,0.5,0.7,0.9时得到了光强和散射系数曲线图。为



(a) g and simulated light intensity curve



(b) g and simulated scattering coefficient curve

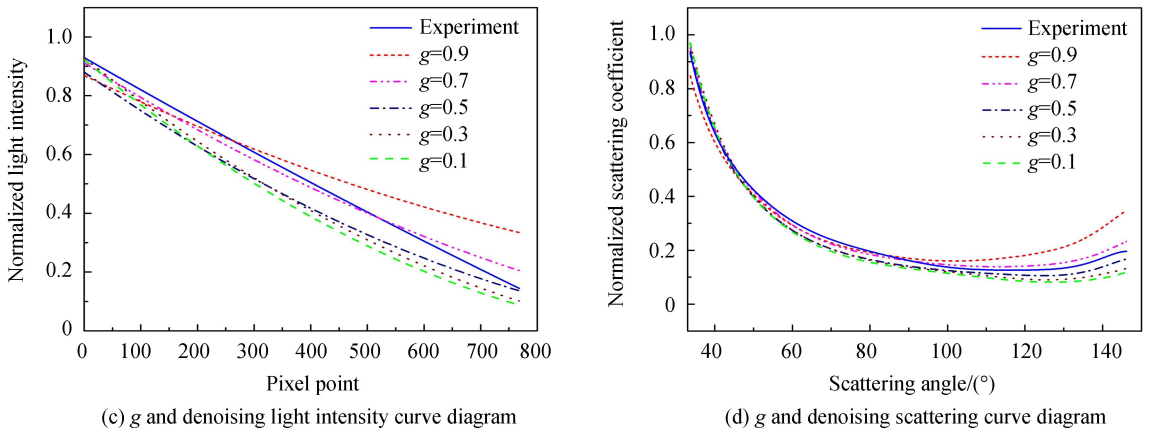


图5 g 与光强、散射系数的关系

Fig.5 Relationship among g , light intensity and scattering coefficient

为了方便观察将图 5(a)、(b) 曲线去噪得到了图 5(c)、(d)，由图 5(c) 可以看出随着 g 的改变光强曲线的斜率发生改变，随着 g 增大光强曲线斜率变平缓；由图 5(d) 可以看出改变 g 对散射角在 100° 以内的散射系数影响不大；但是对散射角大于 100° 的散射系数影响较大。图 5(d) 中，随着 g 增大散射系数曲线尾部的上翘越明显，这是因为随着 g 的增大，前、后向散射比例较大，使得散射介质末端出射的光子数变多，以至于以大散射角出射的光子进入光子检测器的概率增大，随之得到散射系数曲线尾部上翘。因此在相同能见度情况下，不同 g 会造成侧向散射的回波信号不同。

基于上述分析和仿真结果，对天气晴朗，湿度相同（不考虑湿度影响），能见度不同的三天进行了实验。依据测得的实验结果进行蒙特卡洛仿真，调整 g 和 μ_s ，得到了三天内不同能见度条件下的实验大气散射系数曲线及对应的仿真散射系数曲线，如图 6(a)、(b) 所示。

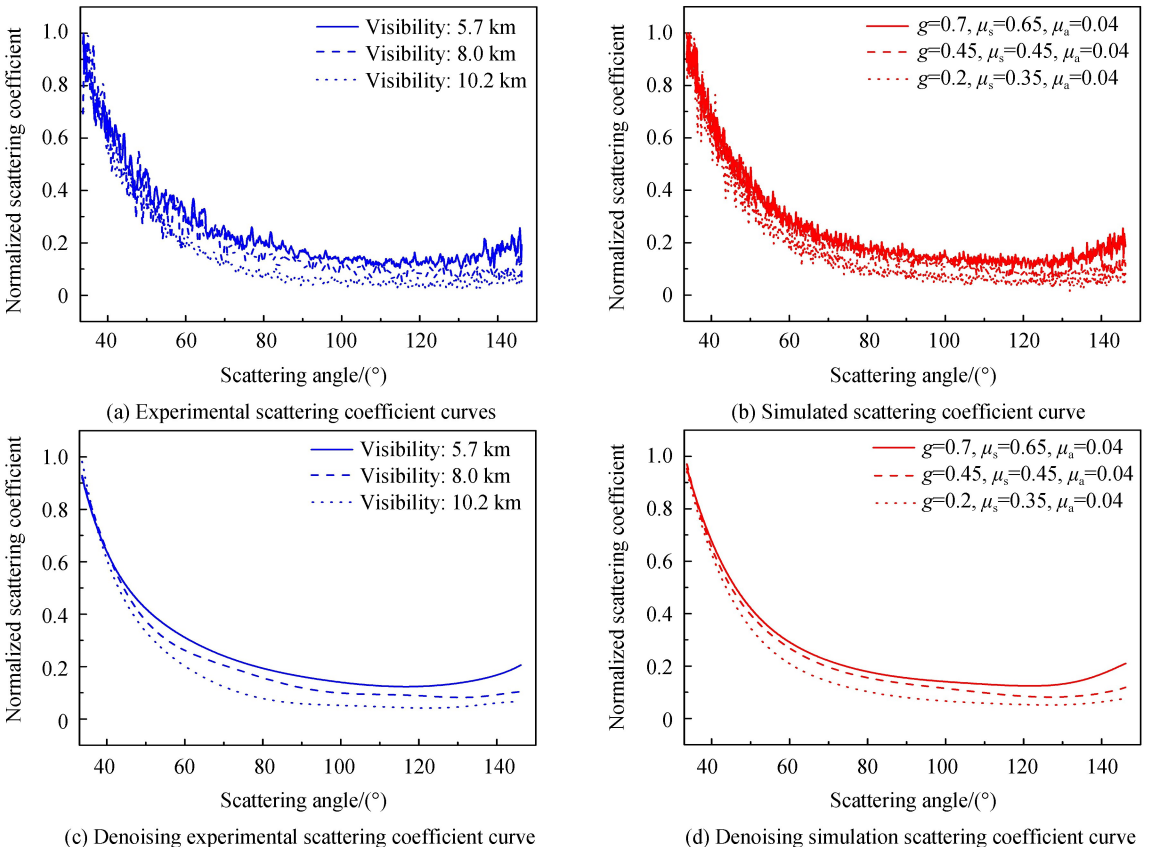


图6 不同大气条件下，实验与仿真的散射系数曲线

Fig.6 Experimental and simulated scattering coefficient curves under different atmospheric conditions

图 6(a)、(c) 分别用实线, 虚线和点虚线画出了能见度为 5.7 km, 8.0 km, 10.2 km 时的实验散射系数曲线. 图 6(b)、(d) 分别用实线, 虚线和点虚线画出其相对应的仿真散射系数曲线. 为了去除噪声毛刺的影响, 通过去噪将图 6(a)、(b) 转换成图 6(c)、(d) 所示去噪的实验及仿真散射系数曲线图. 通过图 6(c)、(d) 可知, 随着能见度的增大散射系数曲线整体下降, 这是由于能见度越大实验中大气对激光束的散射能力越弱, 光子从散射介质进入到光子检测器的概率也越低, 对应到 μ_s 也越小. 分析图 6(c)、(d) 还发现能见度越低, 对应的仿真 μ_s 和 g 相对较高, μ_s 较高说明光子在散射介质中传输的每一步步长变短, 也进一步说明了大气气溶胶浓度较大, 这与能见度低的现象吻合; g 越大, 则说明能见度越低时散射系数曲线的尾部更为上翘. 为了进一步量化实验曲线与仿真曲线的拟合关系, 将图 6(a) 中的实验数据与仿真数据做了与前文图 4 相同的处理, 得到如图 7 所示的三条不同能见度下的关系曲线.

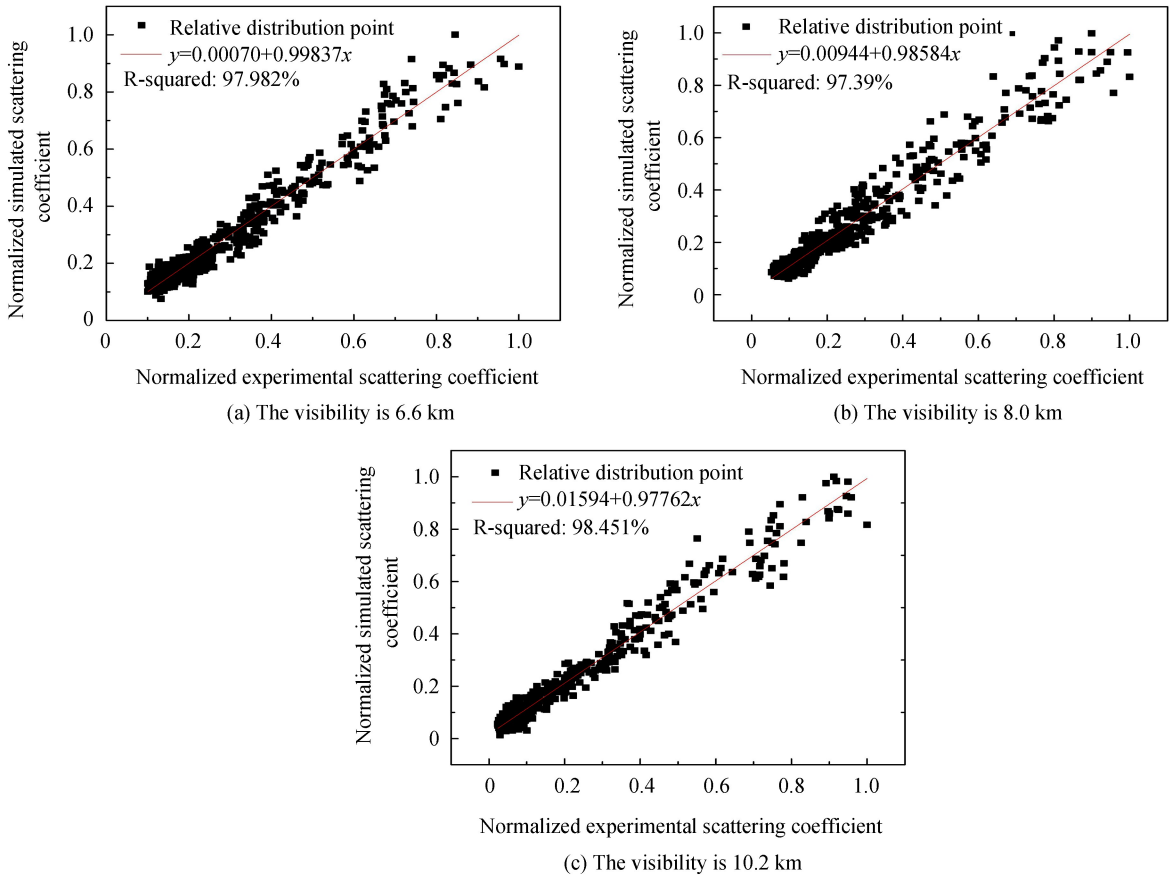


图 7 不同大气条件下, 实验与仿真散射系数的关系拟合图

Fig.7 The relationship between the experimental and simulated scattering coefficients under different atmospheric condition

图中线性拟合后的方程分别为: $y = 0.00070 + 0.99837x$, $y = 0.00944 + 0.98584x$, $y = 0.01594 + 0.97762x$. 线性拟合优度分别为 97.98%, 97.39%, 98.45%. 由关系图可以看出实验和仿真数据相关性较强, 说明, 利用该蒙特卡罗仿真的方法通过改变 g 和 μ_s 等重要参数可以较为准确地模拟激光路径在不同的大气条件下的侧向散射机制. 这对分析大气中光传输路径情况有重要的意义.

4 结论

利用蒙特卡罗方法建立了 CCD 侧向散射激光雷达的理论模型, 通过仿真和实验对比证实了蒙特卡罗方法模拟侧向散射激光雷达散射机制的可行性. 在仿真过程中发现 μ_s 和 g 等参数对激光侧向散射机制有较大的影响, μ_s 主要影响散射曲线的整体高低, g 则影响散射曲线的尾部上翘程度, 仿真 μ_s 与实验的相关程度超过 95%, 二者具有较强的一致性.

参考文献

- [1] CHEN Min, SUN Dong-song, GU Jiang, *et al.* Two-dimensional distribution of aerosol measured by lidar[J]. *Infrared*

- and Laser Engineering, 2007, **36**(3): 369-372.
- 陈敏, 孙东松, 顾江, 等. 激光雷达探测的大气气溶胶空间二维分布[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(3):369-372.
- [2] ZHANG Chao-yang, SU Lin, CHEN Liang-fu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(5): 0513002.
张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, **40**(5):0513002.
- [3] LIU Cong, SU Lin, ZHANG Chao-yang, et al. Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(4): 0413001.
刘聪, 苏林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J]. 中国激光, 2015, **42**(4):0413001.
- [4] MAO F Y, WEI G, LI J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(4): 907-912.
- [5] BARNES J E, BRONNER S, BECK R, et al. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2647-2652.
- [6] MENG Xiang-qian, HU Shun-xing, WANG Ying-jian, et al. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 8-13
孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(9):8-13.
- [7] ZACCANTI G, BRUSCAGLIONI P, DAMI M. Simple inexpensive method of measuring the temporal spreading of a light pulse propagating in a turbid medium[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(27): 3938-3944.
- [8] CHENG Wen, LI Jun-shan, SHE Ning, et al. Monte Carlo Simulation of infrared radiation through smoke screen[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(11): 672-675.
程文, 李俊山, 余宁, 等. 红外辐射在烟幕中的蒙特卡罗模拟[J]. 红外技术, 2010, **32**(11):672-675.
- [9] XU lan-qing, LI Hui, XIAO Zheng-ying. Discussion on backscattered photon numbers and their scattering events in a turbid media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 6030-6035.
徐兰青, 李晖, 肖郑颖. 基于蒙特卡罗模拟的散射介质中后向光散射模型及分析应用[J]. 物理学报, 2008, **57**(9):6030-6035.
- [10] COHENTANNOUDH C. Nobel lecture: manipulating atoms with photons[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, **70**(3): 707-719.
- [11] DU Yong-cheng, YANG Li. Monte-Carlo algorithm for phase function of medium scattering in radiative heat transfer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(7): 1908-1911.
杜永成, 杨立. 辐射传输介质散射相函数的蒙特卡罗算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(7):1908-1911.
- [12] ZHENG Y C, VOELGER P. Monte Carlo simulation of LIDAR return signal multiple scattering intensities from homogenous haze[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2001, **13**(2): 70-77.
- [13] SUN Xian-ming, XIAO Sai, WAN Long, et al. Monte Carlo simulation of polarization lidar multiple scattering depolarization by water cloud[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(11): 1113005.
孙贤明, 肖赛, 万隆, 等. 蒙特卡罗方法模拟水云对偏振激光雷达的多次散射去极化[J]. 中国激光, 2015, **42**(11): 1113005.
- [14] DU Zhu-feng, LU Yi-min, YANG Zong-kai, et al. Monte Carlo calculations of the received oceanic lidar signals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(1): 52-57.
杜竹峰, 卢益民, 杨宗凯, 等. 海洋激光雷达接收信号的 Monte Carlo 计算[J]. 中国激光, 1999, **26**(1):52-57.
- [15] ZHANG Yu-zhen, WANG Yue-feng, DONG Wei, et al. Monte Carlo simulation of returned signal of Doppler lidar[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(4): 344-350
张育真, 汪岳峰, 董伟, 等. 多普勒激光雷达回波信号的蒙特卡罗模拟[J]. 激光技术, 2009, **33**(4):344-350.
- [16] SCHOLTEN R E, GUPTA R, MCCLELLAND J J. Laser collimation of a chromium beam[J]. *Physical Review A*, 1997, **55**(2): 1331-1338.
- [17] TAO Z M, LIN D, WANG Z Z, et al. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 1127-1134.
- [18] LI Li-fang, ZANG Ji-long, LI Xiao, et al. Study on extinction characteristics of aerosol in near-infrared bands[J]. *Laser and Infrared*, 2013, **43**(1): 24-28
李丽芳, 张记龙, 李晓, 等. 近红外波段气溶胶的消光特性研究[J]. 激光与红外, 2013, **43**(1):24-28.
- [19] GENG Biao, HE Yong-qiang, WU Lin, et al. A method of calculating the coefficient of atmospheric average attenuation for certain spectral waveband[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(6): 323-326.
耿彪, 何永强, 武琳, 等. 一种计算某一波段大气平均衰减系数的方法[J]. 红外技术, 2009, **31**(6):323-326.
- [20] CHEN Ming, TIAN Yan, PENG Fu-yuan, et al. Study of asymmetric factor in HG scattering phase function[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **37**(9): 25-28.
陈明, 田岩, 彭复员, 等. HG 散射相函数中非对称因子研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(9):25-28.

Foundation item: The Natural Science Foundation of China (No. 61705055), The National Key Laboratory of Nuclear and Biochemical Disaster Protection Foundation of China(No.SKLNBC2015G03)

引用格式: FENG Bing, HU Miao, LI Peng, et al. Monte Carlo Simulation and Experimental Study of Side-Scattered Lidar Echo Signals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1028002

冯冰, 胡淼, 李鹏, 等. 侧向散射激光雷达的蒙特卡罗仿真与实验研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1028002