

激光引信在降雨中的光束扩展特性

郭 婧 张 合 王 晓 锋

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要 激光引信在降雨中工作时会受到雨滴的散射和衰减效应,使光束质量变差,回波能量减小,从而影响探测系统的性能。以蒙特-卡罗方法为基础,给出了激光在降雨中的传输模型,分析不同模拟条件下光束的扩展特性,并进行实验测试。由仿真分析可知,雨滴对光束的散射作用导致光斑扩散,从而光束能量密度减小,并且随着降雨强度、传输距离和光束发散角的增大,光子散射次数增多,光斑直径扩大,到达接收面的光子减少,光束能量衰减。实验测试结果与仿真计算基本一致,最大误差不超过 4%,很好地验证了模型的准确性。

关键词 激光技术;激光引信;降雨衰减;蒙特-卡罗模拟;光束扩展

中图分类号 TJ43⁺9.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0113001

Beam Spread Characteristics of Laser Fuze in the Rain

Guo Jing Zhang He Wang Xiaofeng

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The laser fuze working in the rain would be scattered and attenuated by the raindrops, so that the beam quality will decrease and echo power reduce, consequently affect the function of detecting system. Based on Monte-Carlo method, the transmission model of laser in the rain is founded, and beam spread characteristics at different simulation conditions are analyzed, and the model is validated by experiments. The simulation results indicate that the raindrop scattering induced to beam spread and power density decreasing, and along with the augment of rainfall rate, transmission distance and beam divergence, the photon scattering times increase and spot diameter extends, the photons arriving at the receiving surface decreases and beam power attenuates. Experimental results are consistent with the simulation calculations and the largest error is not more than 4%, which greatly agree with the model.

Key words laser technique; laser fuze; rain attenuation; Monte-Carlo simulation; beam spread

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 140.3070; 290.1310; 290.4210

1 引 言

激光引信因具有很好的抗电磁干扰能力,且测距精度高,可替代无线电引信精确实现弹丸的爆点控制,因此被广泛应用于各种类型的战术导弹及常规弹药中。然而,激光引信容易受到自然环境的影响,云层、薄雾、雨雪等悬浮粒子对激光信号具有散射和衰减作用,使系统性能下降,严重时甚至会造成失效。

国内外学者针对沙尘、云雾、湍流这些复杂气候做了大量的研究,分别从理论分析、数值模拟和实验

测试等研究激光信号在散射介质中的传播特性^[1~5],而脉冲激光在降雨环境下的传输特性研究则很少,Liu 等^[6]采用 T 矩阵法分析了脉冲波形在湍流、云雨雾中的传输特性,Eremin 等^[7]运用离散信源法研究了线性排列雨滴的多次电磁散射,S. T. Hong 等^[8]给出了波长为 0.6943 μm 和 10.6 μm 的光脉冲在雨雾、湍流等介质中的数值计算结果。上述研究主要分析了降雨散射对脉冲信号畸变及延时的影响,并未考虑散射对光束扩展的影响,而雨滴

收稿日期: 2011-05-25; **收到修改稿日期**: 2011-08-09

基金项目: 国家部委基金(9140A05010610BQ02)资助课题。

作者简介: 郭 婧(1984—),女,博士研究生,主要从事引信智能化与灵巧化设计方面的研究。

E-mail: sandyguo0826@163.com

导师简介: 张 合(1957—),男,教授,主要从事引信新探测技术方面的研究。E-mail: hezhangz@mail.njust.edu.cn

的散射作用,将导致光束在空间上的扩散,使得回波能量减小,从而光束能够传输的距离就越短,影响探测系统的性能。本文以蒙特-卡罗方法为基础,给出了激光在降雨中的传输模型,分析不同模拟条件下光束的扩展特性,并进行实验测试。

2 激光光束在降雨中的衰减

激光光束在降雨中传输时,会受到雨滴的吸收和散射作用。吸收损耗随波长而发生变化,散射不引起激光光束能量的损耗,但会改变激光光束能量原来的空间分布,所以经散射后,会导致原来传播方向上激光光束能量的衰减。波长为 λ 的激光光束在降雨中的衰减系数可表示为

$$\gamma(\lambda) = \mu_s(\lambda) + \mu_a(\lambda), \quad (1)$$

式中 $\mu_s(\lambda) = \int_{D_1}^{D_2} \sigma_s(D)N(D)dD$ 为散射系数,

$\mu_a(\lambda) = \int_{D_1}^{D_2} \sigma_a(D)N(D)dD$ 为吸收系数。其中, $N(D)$

为雨滴尺寸分布函数, $\sigma_a(D)$ 为雨滴吸收截面, $\sigma_s(D)$ 为雨滴散射截面,它是粒子折射率 $n(\lambda) = n_r(\lambda) - in_i(\lambda)$ 和尺度参数 $\alpha = \pi D/\lambda$ 的函数,可由 Mie 散射理论精确地计算。但 Mie 理论的数值计算受到粒子尺寸参数 α 的限制,对于雨滴等大粒子的散射计算不适用,因此可采用近似公式计算^[9]

$$\sigma_s = \frac{\pi D^2}{4} \left[1 - J_0^2(\alpha) - J_1^2(\alpha) + \int_0^\pi (\epsilon_1 \sin^2 \varphi + \epsilon_2 \cos^2 \varphi) G \sin \theta d\theta \right], \quad (2)$$

式中 J_0 、 J_1 为零阶、一阶贝塞尔函数, φ 为偏振角, ϵ_j ($j=1,2$) 和 G 分别表示为

$$\epsilon_j = (1 - r_j^2)^2, \quad (3)$$

$$G = \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta |d\theta/d\tau|} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta} \left| \frac{1}{2 - 2 \tan \tau / \tan \tau'} \right|. \quad (4)$$

式中 r_1 和 r_2 为菲涅耳反射系数, θ 为散射角, τ 和 τ' 分别为入射角余角和折射角余角。

Van de Hulst^[10] 给出了一个粒子吸收效率因子的近似计算公式

$$Q_{\text{abs}}(\lambda, D) = \left\{ 1 + \frac{\exp[-4x n_i(\lambda)]}{2x n_i(\lambda)} \right\} + \frac{\exp[-4x n_i(\lambda)] - 1}{8x^2 n_i^2(\lambda)}, \quad (5)$$

式中 $x = 2\alpha(n_r - 1)$, 吸收效率因子与几何截面面积

的乘积为雨滴吸收截面 $\sigma_a(\lambda, D)$ 。

我国从 20 世纪 60 年代开始就已对雨滴谱进行了观测和研究,这些研究表明,负指数(M-P)分布对于稳定降水的雨滴谱拟合效果较好,对于起伏变化较大的降水,在小滴和大滴段拟合误差较大;与 M-P 分布相比, Gamma 分布对各类降水谱的拟合效果都很好,尤其对于小滴段的描述。文献[11]利用 1992 年夏季广州地区雨滴尺寸分布测量数据和广义 Gamma 分布模型,通过优化计算得到了广州地区雨滴尺寸分布模型,这一模型与实测雨滴尺寸分布间有较好的一致性,最后得到雨滴尺寸分布模型为

$$N(D) = 230600 P^{0.364} D^{-0.274} \times \exp(-7.411 P^{-0.0527} D^{0.452}). \quad (6)$$

根据(1)~(6)式,计算波长为 1.064 μm 的激光在不同降雨率下的散射和衰减系数如表 1 所示。

表 1 不同降雨量下的衰减系数

Table 1 Attenuation coefficient of different rainfall rates

Rainfall	Rainfall rate / (mm/h)	Scattering coefficient / m^{-1}	Attenuation coefficient / m^{-1}
Drizzle	5.00	0.0013	0.00132
Moderate rain	12.5	0.0024	0.00244
Downfall	25.0	0.0038	0.00387
Rainstorm	100	0.0097	0.00991

3 光束扩展的蒙特-卡罗模型

研究光在散射介质中传播的过程,主要有两种方法,分析法和蒙特-卡罗(M-C)法。由于大气中传输介质的复杂性和时变性,利用传统的分析法来描述光在多散射介质中的传播,必须做大量简化假设,以致对要估计的结果影响很大;M-C 法通过光子被介质中随机分布粒子的多次散射和吸收过程来模拟研究电磁波的传播特性,已经成为研究光与强散射介质相互作用的常用方法和非实验检验标准^[12]。因此, M-C 法可用来研究激光在降雨中传播的多重散射效应对光斑扩展变化规律的影响。

根据光的粒子性,可以把激光光束看成是由很多光子组成的光子束,这样光的传输问题就转化为光子的传输问题。M-C 法认为光子与随机分布粒子相互作用为弹性散射,光子在随机分布的粒子中或被散射或被粒子吸收,每个光子遭受多重散射时,每一次散射只与前一次散射有关^[13~15]。通过追踪光子与散射粒子间的随机碰撞过程,来分析光子在

接收平面的分布情况。图 1 为激光光束在随机雨介质中的光子传输模型。

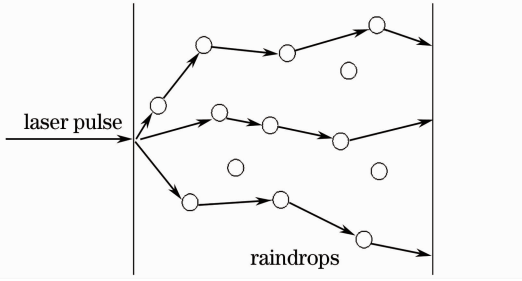


图 1 光子在随机雨介质中的传输

Fig.1 Transmission of photons in the rain

由于散射作用,光在传输过程中部分光子会偏离原传输方向导致其在空间上的扩展,使得准直光束在接收器处呈光斑状。因此,研究不同传输距离的光斑分布,对于了解接收系统所处位置的光信号强度分布及设计激光器发射功率、发散角等具有一定的参考指导作用。

激光光束在降雨中散射的 M-C 模型是基于光子运动轨迹的计算机模拟,其基本思想是,光子以一定的方向进入降雨介质,确定发生碰撞后实时给出光子下一次散射的步长,并由适当的散射相位函数选取散射后新的运动方向。这个过程重复进行,直至光子被探测器接收或者权值低于某一阈值为止,跟踪到达接收器各个光子的时间,进行统计分析即可得到需要的物理参数^[16~18]。

光子的状态主要由光子的空间位置 (x, y, z) 、光子的运动方向 (θ, φ) 和光子的权值 w 3 个参数来表示。对每个光子单独进行初始化,光子由激光源以

某个角度入射降雨介质,初始权值 $w = 1$ 。

已知光子当前的位置 (x, y, z) 和光子的传输方向 (u_x, u_y, u_z) ,光子预期到达的下一个位置 (x', y', z') 为

$$\begin{cases} x' = x + u_x l \\ y' = y + u_y l \\ z' = z + u_z l \end{cases} \quad (7)$$

式中 l 为光子的步长,是对光子自由程概率分布的采样

$$l = \frac{-\ln \xi}{\mu_a + \mu_s}, \quad (8)$$

式中 μ_a 为吸收系数, μ_s 为散射系数, ξ 为 $(0, 1)$ 之间的均匀分布随机数。

光子移动一个步长后,光子的能量会被雨滴部分吸收,权值减小,则修正后光子的权重为

$$w' = w \left(1 - \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} \right). \quad (9)$$

当光子传输到一个新位置时,不仅光子的能量被粒子吸收,而且光子的传输方向会发生改变,由方位角 φ 和散射角 θ 来唯一确定。碰撞后光子的运动方向相对于碰撞前的运动方向的方位角 φ 服从 $(0, 2\pi)$ 上的均匀分布,而散射角 θ 可通过对 Henyey-Greenstein 相函数抽样得到,

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1}{2g} \left[(1 + g^2) - \frac{(1 - g^2)^2}{(1 - g + 2g\xi)^2} \right] \right\}, \quad (10)$$

式中 ξ 是在 $(0, 1)$ 区间服从均匀分布的随机数; g 为各向异性系数,也叫非对称因子。于是通过坐标变换,光子碰撞后新的方向矢量为

$$\begin{cases} u'_x = \sin \theta (u_x u_z \cos \varphi - u_y \sin \varphi) / \sqrt{1 - u_z^2} + u_x \cos \theta \\ u'_y = \sin \theta (u_y u_z \cos \varphi - u_x \sin \varphi) / \sqrt{1 - u_z^2} + u_y \cos \theta, \quad |u_z| < 0.99999. \\ u'_z = -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1 - u_z^2} + u_z \cos \theta \end{cases} \quad (11)$$

如果光子的运动方向接近 z 轴方向,即 $|u_z| > 0.99999$,则新方向可表示为

$$\begin{cases} u'_x = \sin \theta \cos \varphi \\ u'_y = \sin \theta \sin \varphi \\ u'_z = \text{sign}(u_z) \cos \theta \end{cases}, \quad \left[\text{sign}(u_z) = \begin{cases} 1, & u_z \geq 0 \\ -1, & u_z < 0 \end{cases} \right]. \quad (12)$$

4 仿真与实验结果分析

基于仿真模型,对激光光束在降雨介质中的光斑扩展特性进行 M-C 模拟,在不同目标距离对光子进行接收,接收平面中心在 z 轴上,为统计光子到达接收面的位置,假设接收面无限大。统计光子到达

接收平面上的具体位置,即可得到模拟结果。下面对模拟光子个数、传输距离、散射和衰减系数、光束发散角等参数对散射光斑扩展规律的影响进行仿真计算和分析。

图 2 为模拟光子个数分别为 1000、5000、10000

时,准直光束到达接收平面时的光斑位置分布图。其中,光束在雨中传输距离为 100 m,根据表 1 的计算结果,选取散射系数为 0.0038,衰减系数为 0.00387,非对称因子 $g=0.9$ 。从图 2 可知,在接收面中心附近光子数分布最多,并且主要分布在半径为 0.5 m 的范围内,由模型统计计算,不同模拟个数的光子束落在此范围内的概率分别为 97.20%

($N=1000$)、96.22% ($N=5000$)、96.19% ($N=10000$)。虽然,随着模拟光子个数的增加,光斑分布较为分散,范围有所增大,但是变化的范围不是很明显。散射作用使光束发散,光斑扩展,从而光束的能量密度减小。因此,光斑的变大主要是由于雨滴粒子对光束的散射造成的,粒子的吸收基本上不影响光斑的扩展。

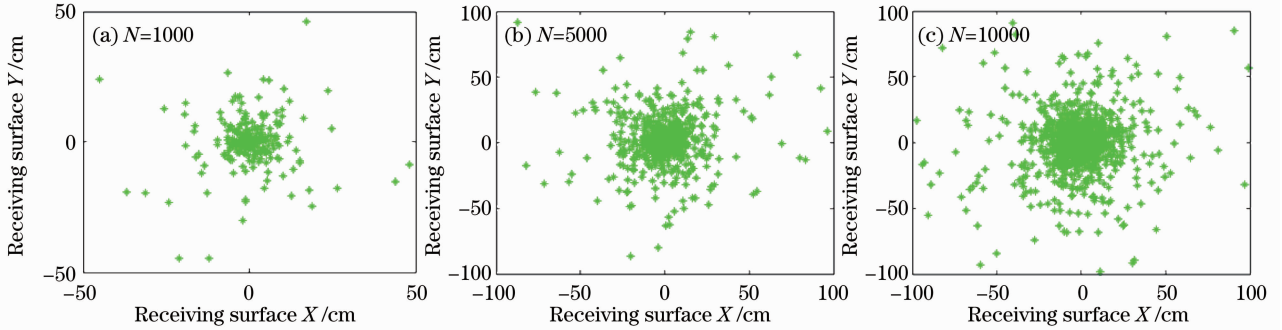


图 2 不同模拟个数时的光斑分布情况

Fig. 2 Photons distribution for different simulating numbers

图 3 为模拟降雨散射系数和衰减系数分别为 0.0038、0.00387 [图 3(a)] 和 0.0097、0.00991 [图 3(b)] 时的接收面光斑分布情况。模拟光子个数 $N=10000$,传输距离为 100 m,非对称因子 $g=0.9$ 。由图可知,随着散射和衰减系数的增加,接收面上的光子分布更分散,光斑直径增大,经统计,光子到达接收平面的概率在散射系数为 0.0038 时是

99.01% 和散射系数为 0.0097 时是 96.92%。由于降雨衰减系数引起光子的步长不同,光子步长的减小将导致光子到达相同目标距离所经历的散射次数增加,因此,降雨强度越大,光子被雨滴散射的次数越多,光斑扩展直径越大,到达接收面的光子减少,光束能量衰减。

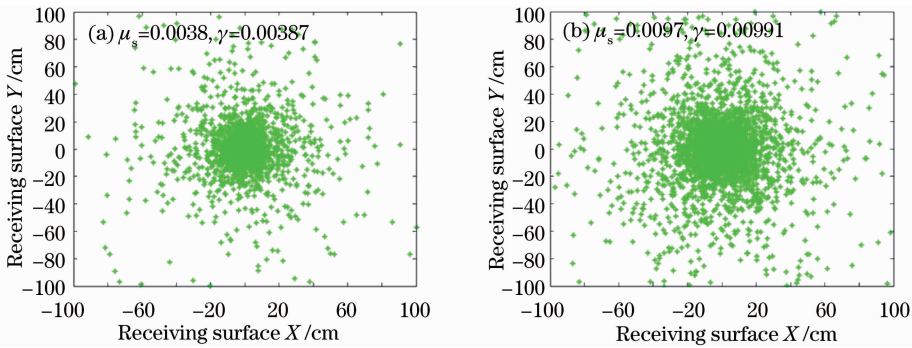


图 3 不同散射系数和衰减系数时的光斑分布情况

Fig. 3 Photons distribution for different scattering coefficients

定义到达目标距离的光子位置与发射光子在接收面的垂直投影点间的距离为光斑半径,则光斑平均半径定义为所有到达目标距离的光子光斑半径的均值。图 4 为不同发散角度的光束在不同传输距离下的光斑平均半径分布曲线。表 2 为在不同传输距离下不同发散度光束的光子到达接收平面的概率。散射和衰减系数为 0.0038 和 0.00387,模拟光子个数 $N=10000$,非对称因子 $g=0.9$ 。由图 4、表 2 可

知,随着雨中传输距离及光束发散角的增大,光斑平均半径增大,光子到达接收平面的概率减小。由于部分光子在被雨滴多次散射过程中,能量衰减甚至消亡,当能量低于探测阈值时,则认为光子消亡而不做统计。因此,随着目标距离和光束发散角的增加,光子在雨中的散射次数增加,光斑由接近光轴分布逐渐变为漫散射分布,光子能量衰减得也越多,被探测接收的概率减小。

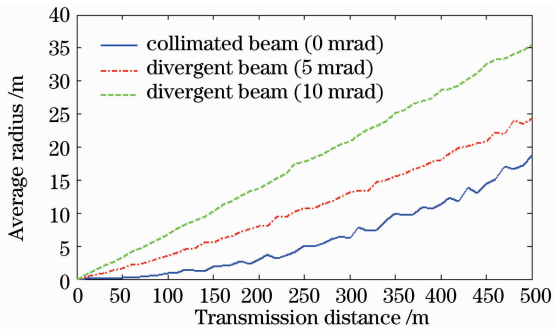


图4 不同传输距离和发散角时的光斑平均半径
Fig. 4 Average spot radius for different distances and radiation angles

表2 不同条件下光子的接收概率

Table 2 Photons receiving probability at different conditions

Transmission distance /m	Collimated beam	Divergence angle	Divergence angle
	(0 mrad)	(5 mrad)	(10 mrad)
100	96.74%	96.39%	95.59%
200	92.39%	91.84%	89.14%
500	76.71%	73.72%	68.75%

表3 计算数值与实验数据

Table 3 Calculation result and experimental data

Distance /m	10		20		30		
	Scattering coefficient	Calculation result	Experimental data	Calculation result	Experimental data	Calculation result	Experimental data
0.0038 (25 mm/h)		99.09%	97.39%	96.98%	93.53%	93.58%	90.23%
0.0097 (100 mm/h)		97.73%	95.83%	91.84%	90.59%	84.69%	82.83%

5 结 论

激光引信在降雨中工作时,会受到雨滴的散射和衰减效应,使光束质量变差,回波能量减小,从而影响探测系统的性能。通过蒙特-卡罗模型分析可知,散射作用使光束发散,光束的能量密度减小,光束的扩展主要是由雨滴的散射造成的。仿真结果表明,模拟光子个数的增加,光斑范围有所增大,但变化的范围不是很明显;散射和衰减系数的增大,会使光斑直径增大,光子到达接收平面的概率减小,因此,降雨强度越大,光子被雨滴散射的次数越多,光斑扩展越大,到达接收面的光子减少,光束能量衰减;随着目标距离和光束发散角的增加,光子在雨中的散射次数增加,光斑由接近光轴的分布逐渐变为漫散射分布,光子能量衰减得也越多,被探测接收的概率减小。由此可知,降雨强度、传输距离和光束发

为验证仿真模型的准确性,利用 Coherent 公司的 PM 系列高灵敏度功率计探头,配置适当的外围仪器,测量激光光束穿过不同距离雨场的透射率与同条件下的光子接收概率仿真结果进行对比分析。实验中,发射光源为 Vector 系列的抽运激光器,发射波长为 $1.064 \mu\text{m}$,光束发散角小于 4.5 mrad ,在传输距离较短时可近似认为准直,现将发射平均功率调整为 15 mW ,重复频率 10 kHz ;探测装置为高灵敏度热敏探头和 LabMax 激光功率能量计表头,工作波段为 $0.3 \sim 11.0 \mu\text{m}$,分辨率小于 $10 \mu\text{W}$,探头口径 19 mm 。降雨环境采用人工模拟降雨设备,降雨测量误差小于等于 2% ,降雨均匀度大于 0.7 ,雨量计分辨率为 0.1 mm ,调节其降雨率大小为 25 mm/h 和 100 mm/h 左右进行测试,根据表 1 可知其对应的散射系数为 0.0038 和 0.0097 。仿真计算数值与实验测试数据如表 3 所示,表中数据显示,实验数据与仿真结果最大误差不超过 4% ,仿真与实测基本一致,很好地验证了模型的准确性。但实测值略小于计算数值,这是由于激光器的出射光束有一定的直径,而仿真模型则近似光束直径为零,因此,会造成一定的误差。

散角对激光在降雨中传输时光束的扩展有着重要的影响。实验测试与仿真结果基本一致,误差最大不超过 4% ,很好地验证了模型的准确性。降雨散射引起激光光束的扩展特性对研究不同传输距离的光斑分布,了解接收系统所处位置的光信号强度分布及设计激光器发射功率、发散角等具有重要的参考指导作用。

参 考 文 献

- 1 P. Sprangle, J. R. Penano, B. Hafizi. Propagation of intense short laser pulses in the atmosphere[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(4): 046418
- 2 Yang Ruike, Han Xiang, Hao Yue. Propagation characteristics of infrared pulse wavesthrough windblown sand and dust atmosphere [J]. *Int. J. Infrared Milli. Waves*, 2007, **28**: 181~189
- 3 Zhang Shiquan. The analysis of scattering effect for the transmission of $1.06 \mu\text{m}$ laser in lower altitude atmosphere[J]. *Int. J. Infrared Milli. Waves*, 2007, **28**: 491~497

- 4 Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin *et al.*. Temporal dispersion of laser pulse through clouds and channel equalization [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(11): 1325~1329
陈纯毅, 杨华民, 姜会林 等. 激光脉冲云层传输时间扩展与信道均衡[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(11): 1325~1329
- 5 Yang Runke, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1393~1397
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1393~1397
- 6 C. H. Liu, K. C. Yeh. Propagation of pulsed beam waves through turbulence, cloud, rain, or fog[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(9): 1261~1266
- 7 Ju. A. Eremin, N. V. Orlov, V. I. Rozenberg. Multiple electromagnetic scattering by a linear array of electrified raindrops [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, **57**(3): 311~319
- 8 S. T. Hong, Akria Ishimaru. Two-frequency mutual coherence function, coherence bandwidth and coherence time of millimeter and optical waves in rain, fog and turbulence[J]. *Radio Science*, 1976, **11**(6): 551~559
- 9 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532 nm and 1064 nm through rain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0101004
郭婧, 张合, 王晓锋. 降雨对 532 nm 和 1064 nm 激光传输的衰减特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0101004
- 10 H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1957. 179
- 11 Zhao Zhenwei. Raindrop size distribution model and prediction of rain attenuation in Guangzhou [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1995, **10**(4): 33~37
赵振维. 广州地区雨滴尺寸分布模型及雨衰减预报[J]. *电波科学学报*, 1995, **10**(4): 33~37
- 12 Z. Guo, S. Kumar, K. C. San. Multidimensional Monte Carlo simulation of short-pulse laser transport in scattering media[J]. *J. Thermophys. Heat Transfer*, 2000, **14**(4): 504~511
- 13 Hu Jing, Yang Zongkai, Yang Daiqin. Smoke particles' recognition and Monte Carlo simulation of laser scattering character[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 950~954
胡静, 杨宗凯, 杨代琴. 烟雾粒子的识别及其激光散射特性的蒙特卡罗模拟[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10): 950~954
- 14 Alexey P. Popov, Alexander V. Priezhev. Laser pulse propagation in turbid media: Monte Carlo simulation and comparison with experiment; Saratov Fall Meeting 2002 [C]. *SPIE*, 2003, **5068**: 299~308
- 15 Edward A. Bucher. Computer simulation of light pulse propagation for communication through thick clouds[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(10): 2391~2400
- 16 Angelo Sassaroli, Costantino Blumetti, Fabrizio Martelli. Monte Carlo procedure for investigating light propagation and imaging of highly scattering media [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(31): 7392~7400
- 17 Zhixiong Guo, Janice Aber, Bruce A. Garetz *et al.*. Monte Carlo simulation and experiments of pulsed radiative transfer [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2002, **73**: 159~168
- 18 R. Graaff, M. H. Koelink, F. F. M. de Mul *et al.*. Condensed Monte Carlo simulations for the description of light transport[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(4): 426~434

栏目编辑: 谢婧