

降雨对无线激光通信的影响

朱耀麟^{1,2} 安然^{2*} 柯熙政¹

(¹ 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)
(² 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要 通过激光信号在雨介质中传输的实验发现,在大雨环境下,激光信号透射率要比在小雨或微雨的情况下大。这说明光信号在小雨时衰减较大,在大雨时衰减较小。这一现象与人们通常所认为的有所不同。针对降雨对激光信号的影响,根据 Mie 散射理论和 Weibull 雨滴尺寸分布模型,分析了不同尺寸的粒子对光的散射作用以及对衰减效率因子的影响,推导出单球粒子对光波的衰减公式,得到了衰减与降雨率的确定关系。通过数值计算发现,与小粒子相比大粒子的前向散射光强更大且更加集中;激光信号在雨介质中传输时,衰减系数在小雨时较大,中雨、大雨时较小,暴雨时不断增大。这一结果与实际情况较吻合,为激光在通信系统中的应用提供了一定的理论依据。

关键词 光通信;降雨衰减;Mie 理论;散射光强;衰减效率因子;雨滴尺寸分布模型

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1206003

Effect of Rainfall on Wireless Laser Communication

Zhu Yaolin^{1,2} An Ran^{2*} Ke Xizheng¹

(¹ Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)
(² Electronic Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract In the experiments of laser signal transport in rain medium, it is obvious that the transmission in heavy rain is bigger than that in light rain. This shows that the attenuation of light signal in light rain is bigger than that in heavy rain. The transmission attenuation of wireless laser communication in rain is noticeable. According to the theory of Mie and Weibull raindrop spectrum, the effects of the particle scales on laser scattering and attenuation efficiency factor are analyzed, and the attenuation formula of the light wave of a single particle is deduced. The definite equations between the attenuation and the rainfall ratio are obtained. The result shows that scattering intensity of particle in heavy rain is bigger than that in light rain in forward direction, and the forward scattering intensity increases. When laser signal transmits through rain, attenuation coefficient in light rain is big, while it is small in moderate rain and heavy rain, and increases in rainstorm. This result coincides with the facts. Attenuation characteristic of laser in rain provides theoretical basis for laser applied in the communication system working in the rain.

Key words optical communications; rainfall attenuation; Mie theory; scattering light intensity; attenuation efficiency factor; raindrop spectrum

OCIS codes 010.1300; 060.4510; 290.4020

1 引言

无线激光通信由于无需授权执照、安全保密性

好、实施成本相对低廉、建网速度快、协议的透明性强、设备尺寸小和信息容量大等优点受到国内外相

收稿日期: 2012-06-17; **收到修改稿日期**: 2012-07-13

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金(11JK1000)、西安工程大学博士科研启动基金项目(BS0722)和西安工程大学教改项目(2010JG12)资助课题。

作者简介: 朱耀麟(1977—),男,博士后,讲师,主要从事通信信号处理、无线通信和多天线传输系统等方面的研究。

E-mail: FZ_ZYL@162.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,博士后,教授,主要从事现代通信技术和信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@xaut.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: anmaoran@163.com

关部门的广泛重视。但信道中的介质如云、雾、雨和沙尘等对无线激光通信有很大的影响,所以在典型天气下的激光通信是人们研究无线激光通信的重要方面。许多通信行业工作者对光通信在不同强度雨介质中的传输特性进行研究^[1~3],文献[1]中提出用光的遮挡作用计算雨中衰减,并假设雨滴对通过的光信号完全阻断,得出雨衰率随降雨强度的增加不断增加,最终阻断光波信号的结论;文献[2]运用夫琅禾费衍射和几何光学散射理论,建立了雨滴对激光的衰减模型,得出随着降雨强度的增大透射率不断减小等结论;文献[3]分析了 Marshall-Palmer 分布、Joss 分布和 Weibull 分布等雨滴尺寸分布模型在不同降雨率中的适用性,并分别求出雨滴衰减系数的仿真曲线。本文根据 Mie 散射理论,通过推导单球粒子对光波的散射及在降雨中光波的衰减系数,对衰减趋势进行了数值分析,其结果与实际情况相吻合。

2 激光信号在雨介质中传输衰减实验

用光功率计测量了激光信号通过不同强度降雨之后的衰减发现^[4],在小雨中光强的衰减要比在大雨中的衰减大,如图 1 和图 2 所示。

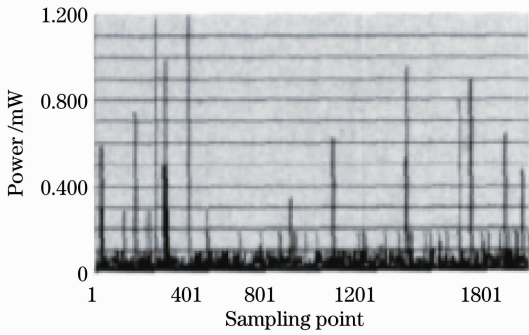


图 1 小雨天气下激光信号的透过功率曲线

Fig. 1 Curve of laser transmission power in light rain

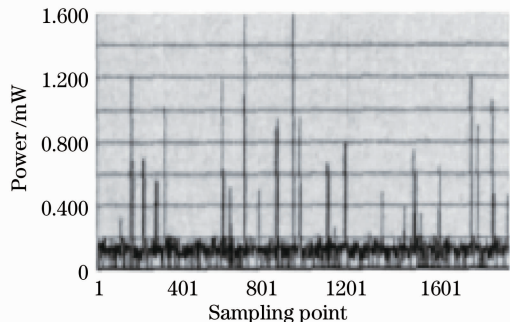


图 2 大雨天气激光信号的透过功率曲线

Fig. 2 Curve of laser transmission power in heavy rain

3 单球粒子的 Mie 散射光强和散射分布函数

降雨是一种常见的天气,在日常的降雨中,小雨时的能见度较低,而大雨时能见度却高于小雨。人眼感知的波长在 313~1050 nm,与部分激光波长范围相同^[5],那么可推测与小雨相比激光在大雨时透射率较大,衰减较小。下面将用 Mie 散射理论^[6]来验证。

当光强为 I_0 ,入射电场的复数振幅为 E_0 ,波长为 λ 的平面电磁波入射到直径为 D 均匀球形粒子时,从粒子中心到散射光波面上一点处的距离为 l ,散射光强度函数 I 和散射分布函数 $\gamma(\theta, \phi)$ 为

$$I = \frac{I_0}{l^2} \gamma(\theta, \phi), \quad (1)$$

$$\gamma(\theta, \phi) = \frac{1}{2k^2} [i_2(\theta) + i_1(\theta)], \quad (2)$$

式中

$$i_1(\theta) = |S_1(\theta)|^2, \quad (3)$$

$$i_2(\theta) = |S_2(\theta)|^2. \quad (4)$$

式中 $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$ 为散射光的强度函数, $k = 2\pi/\lambda$, θ 为散射角, ϕ 为方位角, S_1 、 S_2 称为散射光的振幅函数,根据 Mie 散射理论,可由对称级数给出

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(x, m)\pi_n(\theta) + b_n(x, m)\tau_n(\theta)], \quad (5)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n(x, m)\pi_n(\theta) + b_n(x, m)\tau_n(\theta)]. \quad (6)$$

Mie 系数 $a_n(x, m)$ 和 $b_n(x, m)$ 表示为

$$a_n(x, m) = \frac{\psi_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi'_n(x)\psi_n(mx)}{\xi_n(x)\psi'_n(mx) - m\xi'_n(x)\psi_n(mx)}, \quad (7)$$

$$b_n(x, m) = \frac{m\psi_n(x)\psi'_n(mx) - \psi'_n(x)\psi_n(mx)}{m\xi_n(x)\psi'_n(mx) - \xi'_n(x)\psi_n(mx)}, \quad (8)$$

式中

$$\pi_n = P_n^{(1)}(\cos \theta)/\sin \theta = dP_n(\cos \theta)/\sin \theta, \quad (9)$$

$$\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta), \quad (10)$$

$$\psi_n(x) = \left(\frac{x\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(x), \quad (11)$$

$$\xi_n(x) = \left(\frac{x\pi}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(x), \quad (12)$$

式中 x 为尺寸参数 ($x = 2\pi r/\lambda$); $m = m_1 - jm_2$ 为粒子相对周围介质折射率,当虚部不为零时,表示粒子有吸收; $\pi_n(\cos \theta)$ 和 $\tau_n(\cos \theta)$ 称为角度系数, $P_n^{(1)}$ 是连带 Legendre 函数; $\psi_n(x)$ 、 $\xi_n(x)$ 是 Riccati-Bessel 函数,可分别用第一类 Bessel 球函数 $J_{n+1/2}$ 和半整数阶第二类

Hankel 函数表示；另外， ϕ'_n 和 ξ'_n 表示关于宗量 (argument) 的导数。

4 雨介质中的光波衰减

当微粒的尺度与波长比较接近时，产生 Mie 散射，Mie 散射适用于如雾、霾和小雨等球形粒子的环境。其衰减系数为

$$\alpha = 4.343 \times 10^3 \times \frac{\pi}{4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q_e(x, m) D^2 N(D) dD, \quad (13)$$

式中 $N(D)$ 为雨滴尺度分布函数， D 为雨滴的直径， D_{\min} 、 D_{\max} 分别为雨滴的最小和最大直径， Q_e 为衰减效率因子，它表示入射于粒子几何截面中的能量受

到衰减的比率。

4.1 衰减效率因子和散射效率因子

估计由介质对光的吸收和散射造成的入射能量减少的函数，即衰减效率因子 Q_e 、散射效率因子 Q_s 和吸收效率因子 Q_a ：

$$Q_e(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}[a_n + b_n], \quad (14)$$

$$Q_s(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (15)$$

$$Q_a(x, m) = Q_e(x, m) - Q_s(x, m). \quad (16)$$

Mie 级数项数 n 的取值随着尺度参数变化，很多人根据理论提出 n 的函数形式

$$n_{\max} = \begin{cases} x + 4x^{1/2} + 1, & 0.02 \leq x \leq 8 \\ x + 4.05x^{1/3} + 2, & 8 \leq x \leq 4,200 \\ x + 4x^{1/2} + 2. & 4200 \leq x \leq 20000 \end{cases} \quad (17)$$

4.2 雨滴的尺寸分布特性

在一场降雨中，人们用雨滴尺寸分布函数 $N(D)$ 描述雨滴的尺寸分布状况，单位为 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ，其中 D 表示雨滴的直径，单位为 mm ， $N(D)dD$ 表示在每立方米的体积中直径在 D 与 $(D+dD)$ 之间的雨滴数目。雨滴尺寸分布函数 $N(D)$ 的表达式为

$$N(D) = M_g(D)/v(D), \quad (18)$$

式中 $M_g(D)$ 为雨滴尺寸分布模型，表示每平方米、每秒钟落下的直径为 D 的雨滴总数，单位为 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $v(D)$ 表示雨滴的最终下落速度。

研究工作者提出了许多雨滴尺寸分布模型，如：Laws-Parsons 分布模型、Marshall-Palmer 分布模型、Joss 分布模型、对数正态分布模型、Gamma 分布模型、Weibull 分布模型和广州雨滴尺寸分布模型。

文献[7,8]对几种模型对雨滴数的估计进行比较，指出 Weibull 分布模型比较精确。Weibull 分布模型有一个通用的形式，适用于世界各个地区，表达式为

$$M_g(D) = 2.13 \frac{M_{gt}}{D_0} \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \exp\left[-0.71\left(\frac{D}{D_0}\right)^3\right], \quad (19)$$

式中 M_{gt} 表示每平方米落下的雨滴总数量，它的一个经验表达式 $M_{gt} = 154 \sqrt{R}$ ，单位是 $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，式中 R 表示降雨量，单位是 mm/h ； D_0 表示雨滴的平均直径。

雨滴从云中落向地面的过程中，受到重力和阻滯力的影响，当两者相同时雨滴做匀速运动，这时的速度值称为最终下落速度，较全面的下落速度模型的 Gunn 和 Kinzer 给出：

$$v(D) = \begin{cases} 28D^2, & D \leq 0.075 \text{ mm} \\ 4.5D - 0.18, & 0.075 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm} \\ 4.0D + 0.7, & 0.5 \text{ mm} < D \leq 1.0 \text{ mm} \\ -0.425D^2 + 3.695D + 0.8. & 1.0 \text{ mm} < D \leq 2.6 \text{ mm} \end{cases} \quad (20)$$

5 计算机仿真

5.1 单球粒子的计算机仿真

取光波长为 532 nm 的可见光，研究其遇到雨

滴时的散射光强与散射角的分布图。其对应的水的复折射率^[7~9] m 是 $1.332 - i1.96 \times 10^{-9}$ ，入射光强 $I_0 = 0.05 \text{ W}$ 。 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 时的对数散射光强如图 3 和图 4 所示。

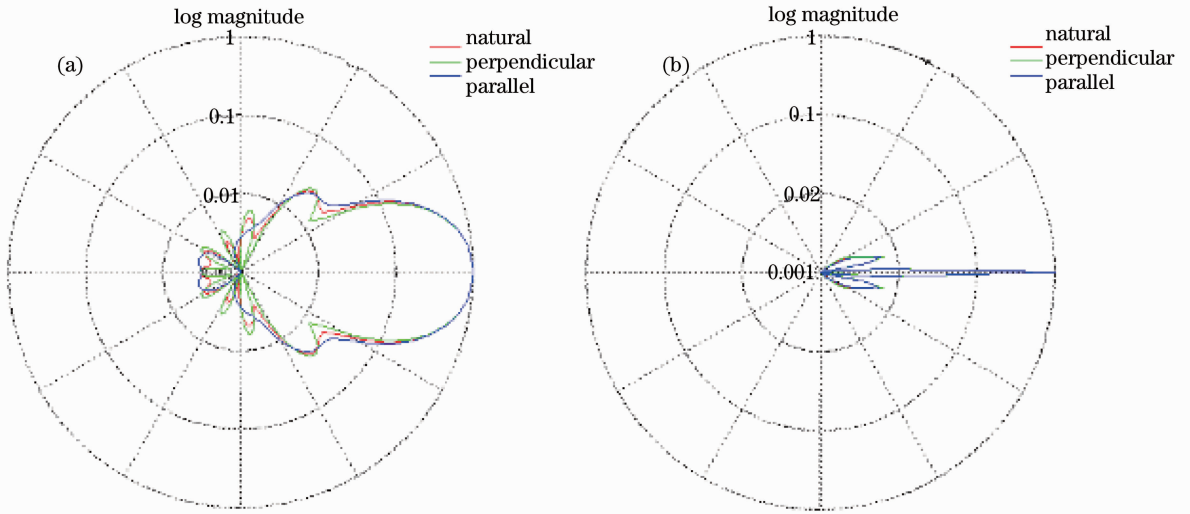


图 3 入射光波长为 532 nm 时的对数散射光强。(a) $D_0 = 2 \mu\text{m}$; (b) $D_0 = 20 \mu\text{m}$

Fig. 3 Logarithmic scattering light intensity in incident wavelength $\lambda = 532 \text{ nm}$. (a) $D_0 = 2 \mu\text{m}$; (b) $D_0 = 20 \mu\text{m}$

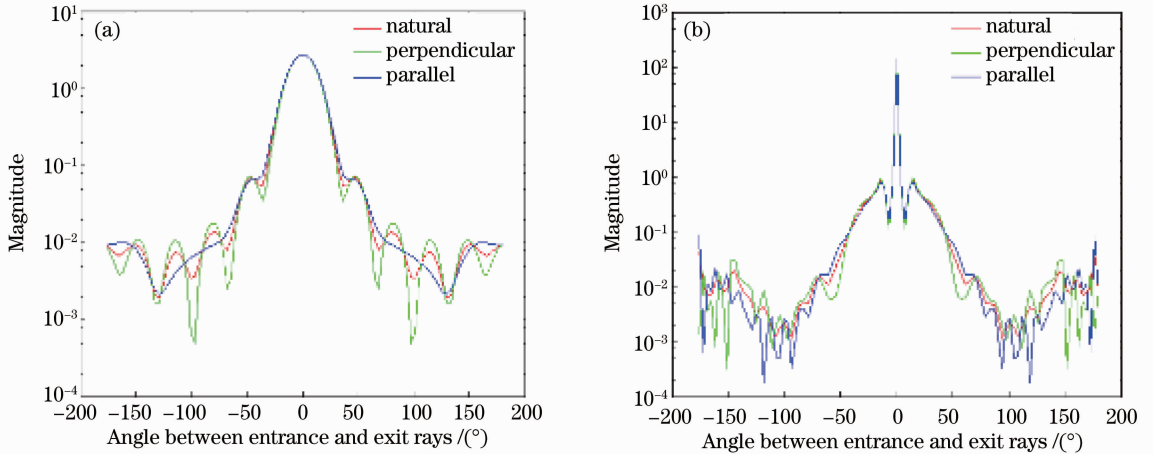


图 4 入射光波长为 532 nm 时的各角度上对数散射光强。(a) $D_0 = 2 \mu\text{m}$; (b) $D_0 = 20 \mu\text{m}$

Fig. 4 Logarithmic scattering light intensity in incident wavelength $\lambda = 532 \text{ nm}$ from all angles. (a) $D_0 = 2 \mu\text{m}$; (b) $D_0 = 20 \mu\text{m}$

由图 3、图 4 可以看出,散射能量主要集中在散射光的前向和后向,且明显大于侧向散射,在同一波长下,直径 $2 \mu\text{m}$ 的粒子比 $20 \mu\text{m}$ 的粒子在侧向上的散射光强大, $20 \mu\text{m}$ 的粒子前向及后向散射光强集中度增加,光强大于 $2 \mu\text{m}$ 的粒子,其前向散射强度约为 $2 \mu\text{m}$ 粒子前向散射强度的 100 倍,所以光强的大小主要取决于粒子群中的小粒子数目。衰减效率因子与尺度参数的仿真图如图 5 所示。

(17)式已给出了 Mie 级数项数 n 的取值范围,当粒子较大时,衰减效率因子的计算工作比较复杂,现取 $n = 500$ 以观察衰减效率因子与尺度参数的关系。当 $m = 1.332 - i1.96 \times 10^{-9}$ 时,衰减效率因子 Q 。随着尺度参数以 2 为中心上下振荡,出现一系列极大值和极小值;尺度参数小于 4 时, Q 。随尺度参数的增大而增大,相当于瑞利近似的情形;随尺度参

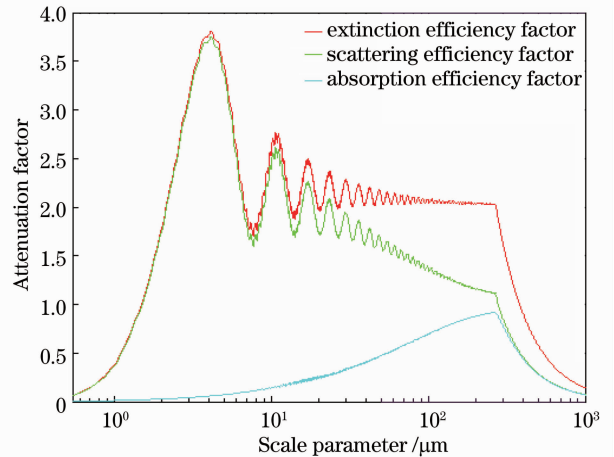


图 5 衰减效率因子与尺度参数的关系图

Fig. 5 Diagrams for attenuation coefficient and scale parameter

数的增大,散射效率因子不断减小,吸收效率因子不断增大;尺度参数大于 280 时,衰减效率因子迅速下降。这说明在应用 Mie 理论时,不能在整体尺度范围内将 Q_s 取 2 计算雨衰,也不能用散射系数代替衰减系数。

5.2 粒子尺寸分布函数的计算机仿真

从图 6 可以看出,随着雨滴直径的增加,不同降雨量情况下雨滴数目的分布趋势,即雨滴尺寸分布。从图中 7 条曲线可以看出,在雨滴直径为 0~6 mm 的范围内,随着降雨量的增加,粒子总量逐渐增加,小雨滴粒子的数目先减小后增加,并超过降雨率最小时的小雨滴粒子数目。由不同尺寸粒子的前向散射的大小可知,小雨滴粒子含量多的降雨率对激光信号的衰减较大。

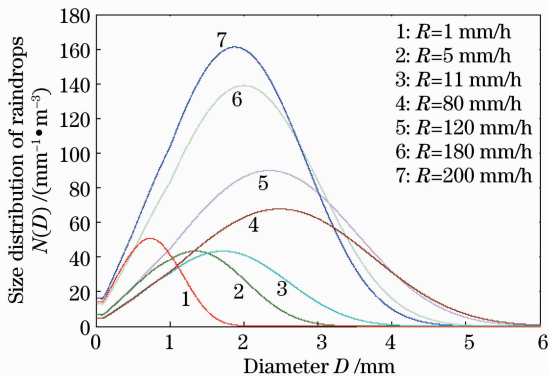


图 6 不同降雨率情况下的雨滴尺寸分布

Fig. 6 Size distributions of raindrops under different rainfall rates

5.3 光波在雨介质中的传输衰减仿真

气象上对降雨强度的划分范围为:小雨 0~2.5 mm/h,中雨 2.6~8.0 mm/h,大雨 8.1~15.9 mm/h,暴雨 16 mm/h 以上。根据(13)式,可以看出衰减系数随降雨强度的变化趋势。

由图 7 可以看出,衰减系数在小雨时较大,达到

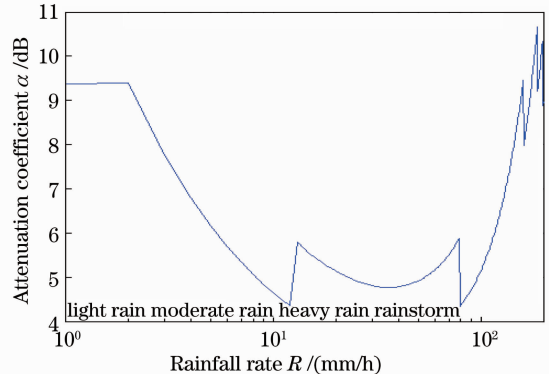


图 7 衰减系数示意图

Fig. 7 Diagram of attenuation coefficient

9.5 dB;随着降雨率的增大,雨衰减系数减小至 4.5 dB;在降雨率为 11~80 mm/h 时雨衰减系数由 5.8 dB 先减小至 5 dB 后增大至 6 dB;当降雨率超过 80 mm/h 时雨衰减系数不断增加并超过小雨时的衰减系数值达到 10 dB 以上。

6 结 论

应用 Mie 理论,分析了单球粒子对激光的散射,散射图和散射分布函数图表明:粒子越大,前向散射越集中,强度也越大。应用 Weibull 分布函数,计算雨滴对激光的衰减,从衰减图可以看出:降雨强度范围为 0~100 mm/h 时,小雨的衰减最大,中雨和大雨阶段的雨衰从开始一直下降,暴雨的雨衰有上升趋势,但雨衰不超过大雨;降雨强度超过 100 mm/h 时,雨衰不断上升并超过小雨时的雨衰值。这一结果与实测值较吻合,为激光在探测系统和通信系统中的应用提供了一定的理论依据。在多种天气存在的情况下^[8],激光信号的衰减特性有待相关工作者的研究。

参 考 文 献

- Hu Zhonghua, Chen Jiabi, Liu Ya. A study of optical transmission through rain[J]. *College Physics*, 2007, **26**(7): 34~39
胡中华,陈家璧,刘雅. 光在雨中传输的研究[J]. *大学物理*, 2007, **26**(7): 34~39
- 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): 1~7
郭婧,张合,王晓峰. 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): 1~7
- Li Di, Chen Hui. Study on attenuation characteristic of laser propagation in rain and fog[J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, **19**(9): 1~5
李迪,陈辉. 激光大气传输的雨雾衰减特性研究[J]. *电子设计工程*, 2011, **19**(9): 1~5
- Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding Theory of Wireless Laser Communications[M]. Beijing: Science Press, 2008. 227~255
柯熙政,殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 227~255
- Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2486~2492
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2486~2492
- Zhang Mingsheng. Laser Light Scattering Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134~139
张明生. 激光光散射谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 134~139
- J. O. Laws, D. A. Parsons. The relation of raindrop size to intensity [J]. *Trans. Am. Geophys. Union.*, 1943, **24**: 452~460
- Liu Min, Wang Hongxing, Wang Qian *et al.*. A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005002
刘敏,王红星,王倩等. 雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005002
- T. Oguchi. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors [C]. *Proc. IEEE*, 1983, **71**(9): 1029~1078

栏目编辑: 王晓珺