**DOI**:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2016. 01. 001

# 中国不同地区降雨中光强衰减与方差特性研究

解孟其, 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院,陕西西安 710048)

摘要:本文为研究雨中激光信号均值及方差与降雨率变化关系,首先通过 MIE 模型计算了不同波 长粒子直径与散射参数的关系。然后分别计算了各种雨滴谱下光的相干场与非相干场的光强衰 减,代入中国不同地区雨滴谱与 Marshall-Palmer 分布进行对比,计算不同雨滴谱下的单位距离光 强衰减,再引入雨滴速度导出散射光强频谱计算散射场强方差。结果表明雨中激光信号方差随降 雨率的增大先增大后减小,且与光强衰减具有一定相关性。最后,代入实测数据对模型进行验证, 结果指出 Marshall-Palmer 分布模型与实测数据较为吻合。

关键词: MIE 散射; 雨滴分布; 光强衰减; 光强起伏

**中图分类号:**TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-4710(2016)01-0001-06

# Research on light intensity attenuation and variance characteristics in rain of different regions in China

XIE Mengqi, KE Xizheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China) **Abstract:** This paper conducts a study of the relationship between the received laser intensity and the rain precipitations. First the MIE model is used to calculate the relationship between particle sizes and scatter parameters. Then the received laser attenuation including both coherent field and non-coherent field is calculated. In those calculation results, Marshall-Palmer distribution is compared with Drop Size Distributions of different regions in China. And the spectrum of scatter light is derived with the velocity of raindrops. It is found that as precipitation increases, the variance increases first, and then decreases. And it also relates to the attenuation. The model is verified by using measured data, with results indicating that the Marshall-Palmer distribution fits these data.

Key words: MIE theory; drop size distribution; intensity attenuation; intensity fluctuation

近年来随着无线光(Free Space Optics, FSO) 通信的发展,星地、空地以及地地之间的FSO通信 系统逐渐实用化<sup>[1]</sup>,制约FSO通信的因素也逐渐凸 显。与光纤通信相比,FSO通信系统受天气条件的 影响很大,在降雨、雾霾和沙尘等强散射天气下,接 收光强信号的衰减和闪烁使FSO通信系统出现误 码率提高、通信中断等情况<sup>[2]</sup>。降雨影响无线光通 信,雨中光路发生衰减、闪烁等现象<sup>[3]</sup>。描述这些现 象需要粒子散射和雨滴谱模型,对于可见光,常用 MIE 模型描述粒子散射<sup>[4]</sup>,雨滴尺寸分布(Drop Size Distribution, DSD)则因雨势、地域不同而不同<sup>[5]</sup>。Al-Gailani等人对热带降雨环境下可见光的 衰减进行了测量<sup>[6]</sup>,并反演了当地的雨滴分布模型。 王红星等人对各种雨滴谱模型中的光强衰减进行了 比较,但对国内各地雨滴谱缺乏针对性<sup>[7]</sup>。气象工 作者对国内各地雨滴谱进行了长期测量,基于不同 模型归纳出当地的雨滴谱分布经验函数<sup>[8-13]</sup>,所得 结果可用于无线光信道建模。柯熙政对各种天气条 件下的 FSO 通信系统性能进行了长期测量,积累了 大量的实测数据<sup>[14-15]</sup>。然而,以往的研究主要集中

通讯作者: 柯熙政, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为无线光通信。E-mail: xzke@263. net

收稿日期: 2015-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61377080);江苏省省级前瞻性研究专项基金(第三批)资助项目(BE2013088);国家科技创新计划基金资助项目(13C26213201867)

作者简介: 解孟其,男,博士生,研究方向为大气信道建模。E-mail: xiemengqi@stu. xaut. edu. cn

在接收光强衰减,单纯研究衰减并不能解释实际中 大雨光透过率大而 FSO 误码率也增大的现象。对 于 FSO 通信,接收光强方差也会影响系统性能<sup>[16]</sup>。 本文通过 MIE 模型和我国各地雨滴谱计算接收光 强和方差的关系,并通过实测数据验证模型。

### 1 接收光强均值

光在发射机与接收机间视线传播时,接收机探测到的信号光强均值可分为相干场 *I*。与非相干场 *I*, 之和,光强衰减是由介质的吸收引起的<sup>[17]</sup>。

$$\frac{I_{\rm t}}{I_{\rm 0}} = \frac{I_{\rm c} + I_{\rm i}}{I_{\rm 0}} = \exp(-\rho \sigma_{\rm a} L)$$
(1)

式中, $\rho$ 为粒子数密度; $\sigma_a$ 是介质的吸收截面,其值为 粒子总截面  $\sigma_i$ 与散射截面  $\sigma_s$ 之差;L 为传播距离。

根据 MIE 散射理论,单个球形粒子的总截面和 散射截面可表示为如下形式:

$$\sigma_{\rm t} = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \qquad (2)$$

$$\sigma_{\rm s} = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left( |a_n|^2 + |b_n|^2 \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{\rm a} = \sigma_{\rm t} - \sigma_{\rm s} \tag{4}$$

式中,*a*<sub>n</sub>和*b*<sub>n</sub>分别为两个无穷数列的第*n*项;计算中 所需的各波长对应的水介质复折射率见文献[18]。

将光学截面 σ 与粒子截面积 S 之比记为粒子的 散射系数,因此,针对粒子的散射截面、消光截面和 吸收截面可分别计算粒子的散射截面系数 α<sub>s</sub>、消光 截面系数 α<sub>i</sub>和吸收截面系数 α<sub>a</sub>。各系数与粒子尺度 参数 x 之间的关系如图 1 和图 2 所示。



图 1 和图 2 中 σ<sub>α</sub>出现的不连续的情况是由于计 算 α<sub>ι</sub>和 α<sub>s</sub>时产生的数值误差。

对 α<sub>a</sub>进行线性拟合,得:

$$\alpha_{a_{\perp} \text{fit}}^{550} = 6.655 \times 10^{-9} x + 1.161 \times 10^{-7}$$
 (5)

$$\alpha_{a\,\text{fit}}^{650} = 5.564 \times 10^{-8} x + 3.577 \times 10^{-7}$$
 (6)





计算中用式(5)和式(6)替代 $\alpha_a$ 可以简化计算。 将 $I_1$ 与 $I_0$ 的比值转为单位为 dB/km 的单位长度的 光强衰减系数,则有<sup>[19]</sup>:

$$\frac{I_{t}}{I_{0}}(dB) = 4.343 \times 10^{3} \times \frac{\pi}{4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \alpha_{a}(x,m) D^{2} N(D) dD$$
(7)

式中, *x* 为粒子尺度参数, *m* 为介质复折射率, *N* 为 粒子尺度分布函数, *D* 为粒子直径。

对于各种雨势下的雨滴粒子尺度分布函数,有 许多符合当地实际情况的拟合公式,常见的雨滴粒 子尺度分布为指数型分布,具体有 Marshall-Palmer 分布和 Gamma 分布等。我国气象工作者针对各地 雨谱进行了长时间的测量,积累了大量的数据并对 其进行了拟合,得到了不同的雨滴谱经验函数。目 前可见于文献的雨滴尺度分布有广州、青岛、沈阳、 长春、西安和宁夏部分地区<sup>[8-13]</sup>,各地雨滴谱分布函 数详见表1。

表 1 各地雨滴谱分布函数 Tab.1 Drop size distribution functions in different places of China

	*
分布地区	表达式(单位:个/(m <sup>3</sup> ·mm))
广州市	$N(D) = 230600 p^{0.364} D^{-0.274} \times \exp(-7.411 p^{-0.0527} D^{0.452})$
长春市	$N(D) = 2020 p^{-0.2} \exp(-3.18 p^{-0.28} D)$
沈阳市	$N(D) = 13829.7 p^{0.1} \exp(-4.56 p^{-0.16} D)$
青岛市	$N(D) = 1387 p^{0.4052} \exp(-2.38 p^{-0.0877} D)$
宁夏部 分地区	$N(D) = 5688.2p^{0.3996} \exp(-4.05p^{-0.1213}D)$
西安市	$N(D) = \begin{bmatrix} 257 p^{0.315} (8315 p^{-0.202})^2 D/2 \end{bmatrix} \times K_0 (8315 p^{-0.202} D/2)$
Marshall-	

Marshall-Palmer 分布  $N(D) = 8000 \exp(-4.1p^{-0.21}D)$  将各种雨滴谱代入式(7)中,计算得到光在不同 降雨率下传播时光强总衰减,如图 3 和图 4 所示。



图 3 波长 550 nm 光传输总衰减随各地降雨率变化图 Fig. 3 Total transmission attenuation in rain of 550 nm wavelength light



图 4 波长 650nm 光传输总衰减随各地降雨率变化图 Fig. 4 Total transmission attenuation in rain of 650 nm wavelength light

从图 3 和图 4 可看出,由雨滴吸收引起的光强 衰减随着降雨率的增加而增加。与 M-P 分布比较, 各地降雨光强衰减分为两组:广州和青岛单位距离 光强衰减大于 M-P 分布;其它地区单位距离光强衰 减小于 M-P 分布。这表明广州青岛两地相同降雨 率下雨滴对光的吸收能力更强。对比图 3 和图 4, 由于水的复折射率虚部在可见光波段随着波长增加 而增大,650 nm 红光较 550 nm 绿光被水介质吸收 得更多,单位距离内的衰减更大。

#### 2 相干场和非相干场的均值

相干场衰减可认为是光在传播路径上由介质光 学厚度产生的等比例衰减,根据比尔朗伯定理:

$$\frac{I_{\rm c}}{I_0} = \exp(-\rho\sigma_{\rm t}L) \tag{8}$$

与式(7)类似,将 $I_{c}$ 与 $I_{0}$ 的比值转为以 dB/km 为单位的光强衰减系数,可得:

$$\frac{I_{\rm c}}{I_{\rm 0}}(\rm dB) = 4.343 \times 10^3 \times$$

$$\frac{\pi}{4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \alpha_t(x,m) D^2 N(D) dD$$
(9)

根据 MIE 散射理论计算 σ<sub>ι</sub>,代入各地雨滴谱, 不同降雨率下的光传输衰减如图 5 所示。



图 5 波长 650 nm 光传输相干场衰减随各地降雨率变化图 Fig. 5 Coherent field transmission attenuation in rain of 650 nm wavelength light

从图 5 可看出,光强衰减总体随着降雨率的增加而增加。对于可见光来说雨滴粒子的尺度参数普遍较大,大部分粒子的消光截面系数约等于 2,因此波长对相干场衰减影响不大。550 nm 光传输相干场衰减与图 5 几乎完全一致。各地雨滴谱与 M-P 分布比较:其中青岛和沈阳地区雨中的消光率和 M-P 分布很接近;广州地区雨中消光率大于 M-P 分布;当降雨率大于 11 nm/h时,宁夏部分地区雨中消光率也大于 M-P 分布,当降雨率小于 11 nm/h时,消光率略小于 M-P 分布;西安和长春地区雨中 中消光率明显小于 M-P 分布。图 5 也说明,在相同降雨率下,为了达到相等的接收信噪比,在广州地区需要比长春地区更大的发射功率。

由于光强信号的非负性,因此散射导致的光强 起伏也具有均值,光强起伏均值为<sup>[17]</sup>:

$$\frac{I_{i}}{I_{0}} = \exp(-\rho\sigma_{a}L) - \exp(-\rho\sigma_{t}L)$$
(10)

上式为式(7)与式(9)之差,计算波长 650 nm 红光在雨中的非相干场衰减如图 6 所示,散射光强 均值随着降雨率增大先增大再降低。究其原因,可 能是因为由小雨向中雨变化时,雨滴分布谱中雨滴 粒子半径增大而数密度增加不大,此时前向散射强 度会随着粒子增大而增大;当降雨率继续增加时,雨 滴粒子半径增大不明显而数密度急剧增长,雨滴粒 子总的光学厚度增大使得散射光强均值降低。

散射光强均值先增加再降低,因此存在极值,极 值点与波长及雨滴谱有关。不同波长的雨滴复折射 率不同,不同雨滴谱的影响可从图 6 中看出。

对于 650 nm 红光, M-P 分布的雨中散射光强

极大值出现在 12 mm/h 处,其他地区雨滴谱分布下 极值点出现时的降雨率分别为:广州 7 mm/h,沈阳 和青岛 13 mm/h,宁夏 15 mm/h,长春 18 mm/h,西 安 21 mm/h。

同理,计算波长 550 nm 绿光的非相干场衰减, 如图 7 所示。









图 7 波长 550 nm 光传输非相干场衰减随 各地降雨率变化图

Fig. 7 Incoherent field transmission attenuation in rain of 550 nm wavelength light

由于复折射率不同使得介质对不同波长光的吸 收能力不同,相应的极值点也发生变化。对比图 6 和图 7 可知,绿光的散射光强在雨中衰减小于红光。 结果也说明在降雨过程中,接收散射光强随着降雨 率的增大会出现先增大再降低的过程,具体极值点 与传输波长及不同的雨滴谱分布有关。

虽然由散射导致的非相干场也将能量由发射端 传至接收端,但是由于散射介质的随机运动,会导致 非相干场发生随机变化。实际环境中测量到光强信 号在散射介质中发生的间歇性的消光和增强的现 象,可认为是由运动介质散射引起的。实际环境中 的散射光强不是恒值,非相干场场强随时间随机 变化。

## 3 非相干场的频谱特性和方差

运动介质产生时变的散射场,静止状态下微分 界面为 σ<sub>d</sub>的单个粒子以速度 V 运动时,其时间相关 微分散射截面可写为<sup>[17]</sup>:

$$\sigma_{\rm d}(\tau) = \sigma_{\rm d} \langle \exp\left(i\boldsymbol{k}_{\rm s} \cdot \boldsymbol{V}_{\tau}\right) \rangle \tag{11}$$

式中,k。为散射波矢, τ为时差。

将速度 V 分解为平均速度 U 与速度起伏 V<sub>f</sub>之和:

$$\sigma_{\rm d}(\tau) = \sigma_{\rm d} \langle \exp(i\boldsymbol{k}_{\rm s} \cdot \boldsymbol{V}_{\rm f}\tau) \rangle \exp(i\boldsymbol{k}_{\rm s} \cdot \boldsymbol{U}\tau)$$
(12)

微分散射截面与总散射截面的关系为:

$$\sigma_{\rm s} = \int_{4\pi} \sigma_{\rm d} \, \mathrm{d}\omega \tag{13}$$

式中ω为空间立体角。

运动粒子散射场强的时间相关函数 B<sub>u</sub>为:

$$B_{u}(\tau) = \langle u_{f}(\boldsymbol{r}, t_{1}) u_{f}^{*}(\boldsymbol{r}, t_{2}) \rangle = \int_{\boldsymbol{V}} \sigma_{d} \langle \exp(i\boldsymbol{k}_{s} \cdot \boldsymbol{V}_{f}\tau) \rangle \exp(i\boldsymbol{k}_{s} \cdot \boldsymbol{U}_{\tau}) \times \exp(-\gamma_{0} - \gamma') \rho d\boldsymbol{V}$$
(14)

对  $B_u(\tau)$ 做傅里叶变换得到散射场强的功率谱  $W_u$ (维纳辛钦定理):

$$W_{u}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} B_{u}(\tau) e^{j\omega\tau} d\tau =$$

$$(4\rho\sigma_{s}L) \left(\frac{\pi\alpha}{k^{2}U^{2}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\gamma - \frac{\alpha_{p}\omega^{2}}{k^{2}U^{2}}\right) \qquad (15)$$

将上文中的雨滴尺度分布代入式(15)中,得:

$$W_{u}(\omega) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) dD 4\sigma_{s} L\left(\frac{\pi\alpha_{p}(D)}{k^{2}U^{2}(D)}\right)^{\frac{1}{2}} \times \exp\left[-\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D)\sigma_{t} L dD - \frac{\alpha_{p}(D)\omega^{2}}{k^{2}U^{2}(D)}\right]$$
(16)

式中 $\alpha_{\rm p}(D) = 2.77/(1.02\lambda/D)^2$ 。

雨滴速度与雨滴直径有如下近似关系[16]:

$$U(D) = 200.8 \left(\frac{D}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
 (17)

例如设降雨率 *p*=12.7 mm/h,将各种雨滴谱 代入式(16)得到的不同雨势下的散射场强频谱如图 8 所示。M-P 分布下频谱带宽为 12.43 kHz,比 M-P 分布带宽小的模型有长春 10.1 kHz、青岛 11.16 kHz 和西安 11.8 kHz;比 M-P 分布带宽大的模型 有广州 13.38 kHz、宁夏 13.9 kHz 和沈阳 14 kHz。

各个模型对雨滴粒子数目估计不同导致带宽计 算的结果各不相同,影响雨中频谱展宽的主要因素 是雨滴谱中大权重粒子的速度。



图 8 波长 650 nm 光在各地降雨环境中的散射光频谱 Fig. 8 Scattering spectrum of 650 nm wavelength light under different DSDs

从散射场频谱中可得散射场的场强方差,当 ω=0时,由式(15)得:

$$W_{u}(0) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} B_{u}(\tau) d\tau = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \langle u_{f}(\boldsymbol{r}, t) u_{f}^{*}(\boldsymbol{r}, t) \rangle d\tau \qquad (18)$$

对于接收机采集到的离散光强信号,式(18)可 表示为:

$$W_{\rm u}(0) = 2\sum u_{\rm f}^2$$
 (19)

散射场的场强方差可表示为:

$$D(u_{\rm f}) = E(u_{\rm f}^2 - E^2(u_{\rm f}))$$
 (20)

在弱湍流环境下可认为场强均值为 0,场强方 差与 W<sub>u</sub>(0)成正比:

$$D(u_{\rm f}) \propto W_{\rm u}(0) \tag{21}$$

令 ω=0,通过式(16)计算 650 nm 红光在不同 降雨率下传播的散射场强方差如图 9 所示。





从图 9 可看出,散射场方差随着降雨率的增大 先增大后减小。从雨滴谱模型上看,随着降雨率的 增加,首先是占权重大的小雨滴增大导致散射增强, 然后雨滴增大到一定程度便不再增大,此时改为数 量增多从而增大降雨率,粒子数量增加的结果是光 学厚度的增加,导致散射场方差随之减小。

结合图 5 与图 9 可知接收光强均值、场强方差 与降雨率的关系,对于没有记录外场降雨率的 FSO 接收光强,则可以将接收光强与场强方差联系起来。

本文引用西安某地 2007 年与 2014 年 7 月到 9 月间的部分降雨天气下的 650 nm 红光 FSO 实测数 据<sup>[14-15]</sup>,验证光强均值与方差的关系,如图 10 所示, 图中由于大部分方差的数值都很小,因此参照 W<sub>n</sub>(0)定义,将方差数值转换为对数。





有限的实验数据表明,光强方差随着光强均值 的增大而减小,趋势与 M-P 以及各地分布都较为吻 合,这些实验数据可以验证各模型中光强均值与方 差的关系。但是由于实验数据存在电路噪声、对准 误差等因素,造成结果存在一定散布,因此如何区分 各模型的差异还有待于进一步的研究。此外,图 10 中实测数据的方差数值会在光强均值不变的情况下 出现大幅度的变化,是因为在降雨环境中接收光会 出现短时间的衰落或增强。由于出现的时长很短, 对统计得出的均值影响不大,但是会使方差或大或 小地偏离中值。这体现了湍流介质中光传播的时变 非平稳等特性。

#### 4 结 论

本文通过将各种雨滴谱分布代入 MIE 散射模型 中,计算了接收光场中相干场和非相干场强度均值, 重点比较了我国部分地区不同雨滴谱的差异。结果 发现散射光强均值会随着降雨率的增加出现先减弱 再增强的过程,极值点与波长和不同雨滴分布有关。 通过散射场的相关函数计算了接收光强信号的频谱, 代入雨滴粒子速度后得到了接收光强的频谱展宽。 计算不同降雨率下的零频衰减定性分析了散射场强 的方差,结果表明散射场光强方差同样依赖于不同的 雨滴谱分布,随着降雨率的增大接收方差先增大后减 小。最后通过实验数据验证模型,实测数据可以验证 上述模型中光强均值与方差的关系。

#### 参考文献:

- [1] WANG J, LÜ J, ZHAO G, et al. Free-space laser communication system with rapid acquisition based on astronomical telescopes [J]. Optics Express, 2015, 23: 20655-20667.
- [2] GHASSEMLOOY Z, ARNON S, UYSAL M, et al. Emerging optical wireless communications-advances and challenges[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 1738-1749.
- [3] 吴晓军, 王红星, 李笔锋,等. 不同传输环境下大气湍流对无线光通信衰落特性影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0513001.

WU Xiaojun, WANG Hongxing, LI Bifeng, et al. Affect analysis of atmospheric turbulence on fading characteristics in free-space optical system over different environments[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0513001.

- [4] 孙贤明, 韩一平. 冰水混合云对可见光的吸收和散射特性[J]. 物理学报, 2006, 55(2): 682-687.
  SUN Xianming, HAN Yiping. Absorption and scattering of light by ice-water mixed clouds[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(2): 682-687.
- [5] GRABNER M, KVICERA V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links[J]. Lightwave Technology Journal, 2014, 32(3): 513-520.
- [6] SAMIR A Al-Gailani, ABU Bakar Mohammad, US-MAN U Sheikh, et al. Determination of rain attenuation parameters for free space optical link in tropical rain[J]. Optik, 2014, 125(4): 1575-1578.
- [7] 宋博, 王红星, 刘敏, 等. 雨滴谱模型对雨衰减计算的适用性分析[J]. 激光与红外,2012,42(3):310-313.
  SONG Bo, WANG Hongxing, LIU Min, et al. Raindrop size distribution model for applicability analysis of rain attenuation[J]. Laser & Infrared,2012,42(3):310-313.
- [8] 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.
  ZHAO Zhenwei. Rain-drop size distribution model and prediction of rain attenuation in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Radio Science,1995,10(4):33-37.
- [9] 陈德林,古淑芳.大暴雨雨滴平均谱研究[J]. 气象学报,1989,47(1):124-127.
  CHEN Delin, GU Shufang. Research on the mean spectrum of the rain storm[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989,47(1):124-127.
- [10] 郑娇恒,陈宝君.雨滴谱分布函数的选择: M-P和 Gamma分布的对比研究[J]. 气象科学,2007,27(1): 17-25.

ZHENG Jiaoheng, CHEN Baojun. Comparative study of exponential and Gamma functional fits to observed raindrop size distribution [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(1):17-25.

- [11] 黄捷,胡大璋. 青岛地区雨滴尺寸分布模型[J]. 电波 科学学报,1991(增刊1):177-180.
  HUANG Jie, HU Dazhang. Drop size distribution model in Qingdao area[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1991(S1):177-180.
- [12] 牛生杰,安夏兰,桑建人.不同天气系统宁夏夏季降 雨谱分布参量特征的观测研究[J].高原气象,2004, 21(1):37-44.
  NIU Shengjie, AN Xialan, SANG Jianren. Observational research on physical feature of summer rain drop size distribution under synoptic systems in Ningxia[J]. Plateau Meteorology, 2004, 21(1):37-44.
- [13] 孟升卫, 王一平, 黄际英. K 分布雨滴谱的应用[J]. 电波科学学报,1995,10(3):15-19.
  MENG Shengwei, WANG Yiping, HUANG Jiying. The application of K-distributed rain drop size spectrum[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10 (3):15-19.
- [14] 柯熙政,杨利红,马冬冬.激光信号在雨中的传输衰减[J]. 红外与激光工程,2008,37(6):1021-1024.
  KE Xizheng, YANG Lihong, MA Dongdong. Transmitted attenuation of laser signal in rain[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008,37(6):1021-1024.
- [15] 朱耀麟, 安然, 柯熙政. 降雨对无线激光通信的影响
  [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206003.
  ZHU Yaolin, AN Ran, KE Xizheng. Effect of rainfall on wireless laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206003.
- [16] 解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比 的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 110102.

XIE Mengqi, KE Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on signal-to-noise ratio of free space optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 110102.

- [17] ISHIMARU A. 随机介质中波的传播和散射[M]. 黄 润桓,周诗健,译. 北京:科学出版社,1986:132-141.
- [18] 麦卡特尼 EJ. 大气光学分子和粒子散射[M]. 潘乃 先,毛节泰,王永生,译. 北京:科学出版社,1988:237-342.
- [19] 董庆生,赵振维,丛洪军. 沙尘引起的毫米波衰减[J]. 电波科学学报,1996,11(2):29-32.
  DONG Qingsheng, ZHAO Zhenwei, CONG Hongjun. The mm-wave attenuation due to sand and dust[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996,11(2):29-32.