

远红外激光雨中传输损耗的研究

王 喆, 汪井源, 徐智勇, 赵继勇, 陈亦望, 王 荣, 韦毅梅

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 激光在雨中传输时, 会受到雨滴的散射和吸收作用导致功率衰减。首先, 根据 Mie 散射理论, 给出雨中消光系数的计算方法。其次, 介绍了 Joss 和 Weibull 两种雨滴尺度分布, 通过对比分析得出结论 Joss 分布更加准确。最后, 利用 Matlab 对远红外激光在雨中的消光系数和链路损耗进行分析。结果表明: 消光系数随降雨量的增大而增大; 利用光子追踪法计算得到的链路损耗, 由于考虑了光束发散角、接收视场角和散射能量, 较朗伯-比尔定律更加贴近实际情况。

关键词: 雨中损耗; 远红外激光; 雨滴尺度分布; Mie 散射; 光子追踪法

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3092-06

Link loss of long wavelength infrared laser propagating through rain

Wang Zhe, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong, Zhao Jiyong, Chen Yiwang, Wang Rong, Wei Yimei

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Because of the scattering and absorption of raindrops, laser power attenuates when travelling through the rain. Firstly, according to the Mie theory, the method of calculation of the extinction factor in the rain was presented. Secondly, Joss and Weibull raindrop size distributions were introduced, and the comparative analysis was shown that Joss raindrop size distribution was more precise. At last, the extinction factor and link loss of long wavelength infrared laser in the rain were analyzed by using Matlab. From the analytical results, it is concluded that the value of the extinction factor becomes larger with rainrate increasing; Considering beam divergence, field of view and scattering energy, the link loss calculated by photon tracing method is more accurate compared with Lamber-Beer Law.

Key words: link loss in rain; long wavelength infrared laser; raindrop size distribution; Mie scattering; photon tracing method

收稿日期: 2015-02-15; 修订日期: 2015-03-20

基金项目: “区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室”开放基金资助课题(2013GZKF031304)

作者简介: 王喆(1986-), 男, 硕士生, 主要从事无线光通信等方面的研究。Email: ryan324@sina.com

导师简介: 汪井源(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事无线光通信等方面的研究。Email: wjywjy2011@163.com

0 引 言

自由空间光通信是以激光为载体,大气为传输信道的点对点无线光通信。由于其传输速率高、传输容量大、保密性好、无需频段申请、易于架设等特点,在军用、应急通信中有着良好的应用前景,同时自由空间光通信还被认为解决目前宽带传输所面临的“最后 1 千米”问题的方法。因此,越来越多的研究人员致力于这方面的研究,并成功研制出一些可以商用的自由空间光通信系统。但是,自由空间光通信的传输信道是大气,大气中的雾、霾、雨、雪等都会对自由空间光通信产生影响,所以研究不同天气情况下大气信道对激光传输的影响对提高自由空间光通信系统的性能有重要意义。降雨是一种非常普遍的大气现象,对激光传输带来的影响主要体现为功率的衰减。文中根据米氏散射原理给出了激光在雨中传输时衰减的计算方法,介绍了两种不同的雨滴分布,并对雨中激光的衰减进行了仿真分析。

1 激光在雨中的消光系数

大气对激光传输的影响主要体现在大气中的气体分子和气溶胶粒子对激光的吸收和散射两方面。大气中的气体分子对激光的吸收具有一定的波长选择性,在某些波长上大气的透过率比较高,这些波段被称为“大气窗口”。目前自由空间光通信所选用的波长都在“大气窗口”内,因此大气中的气体分子引起的吸收可以忽略不计。由于大气中的气体分子体积远小于传输波长,导致激光产生瑞利散射。由瑞利散射引起的激光功率衰减与波长的四次方成反比,因此大气中的气体分子引起的散射可以忽略不计。综上所述,大气对激光的散射主要是由大气中的气溶胶粒子引起的。大气中的气溶胶粒子,如雾、霾、雨等,会使激光发生 Mie 散射,可以用 Mie 散射理论进行分析。

根据 Mie 散射理论,消光系数为:

$$k_e = \frac{\pi}{4} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} Q_e(x, m) D^2 N(D) dD \quad (1)$$

式中: $N(D)$ 为雨滴尺度分布函数; D 为雨滴直径; D_{\max} 、 D_{\min} 为雨滴的最小直径和最大直径; Q_e 为衰减效率因子。

衰减效率因子 Q_e 表示入射于粒子几何截面中的能量受到的衰减比率。它包含两部分,散射效率因子 Q_s 和吸收效率因子 Q_a ,具体表达式如下^[1]:

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

$$Q_s(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (3)$$

$$Q_a(x, m) = Q_e(x, m) - Q_s(x, m) \quad (4)$$

式中: x 为尺度参数($x=2\pi r/\lambda$); m 为不同波长下的复折射率,可以查表获得; a_n 、 b_n 是 Mie 散射系数,根据 Mie 散射定理, a_n 、 b_n 表示为^[1-2]:

$$a_n(x, m) = \frac{\varphi_n(x) \varphi_n'(mx) - m \varphi_n'(x) \varphi_n(mx)}{\varepsilon_n(x) \varphi_n'(mx) - m \varepsilon_n'(x) \varphi_n(mx)} \quad (5)$$

$$b_n(x, m) = \frac{m \varphi_n(x) \varphi_n'(mx) - \varphi_n'(x) \varphi_n(mx)}{m \varepsilon_n(x) \varphi_n'(mx) - \varepsilon_n'(x) \varphi_n(mx)} \quad (6)$$

其中

$$\varphi_n(x) = \left(\frac{x\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{n+1/2}(x) \quad (7)$$

$$\varepsilon_n(x) = \left(\frac{x\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} H_{n+1/2}^{(2)}(x) \quad (8)$$

式中: $\varphi_n(x)$ 、 $\varepsilon_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数,可以用第一类 Bessel 函数 $J_{n+1/2}(x)$ 和半整数阶第二类 Hankel 函数 $H_{n+1/2}^{(2)}(x)$ 表示。

对于公式(2)、(3)中 Mie 级数项数 n 的取值随尺度参数 x 而变化,根据理论得到 n 的函数形式如下^[1]:

$$n_{\max} = \begin{cases} x+4x^{1/2}+1, & 0.02 \leq x \leq 8 \\ x+4.05x^{1/3}+2, & 8 \leq x \leq 4\ 200 \\ x+4x^{1/2}+2, & 4\ 200 \leq x \leq 20\ 000 \end{cases} \quad (9)$$

计算激光在雨中衰减时,由于雨滴半径最大一般不会超过 4 mm,当半径大于 4 mm 时,雨滴是不稳定的,会发生破裂,因此雨滴半径通常在 0.05~4 mm^[3]。此时,尺度参数 x 的变化范围在 8~4 200, n_{\max} 的函数取公式(9)中的第二个等式。

根据 Mie 散射理论,利用公式(2)~(9)可以对 Q_e 、 Q_s 、 Q_a 进行精确计算,但是计算过程复杂,计算量大。Van de Hulst 发展了一个容易计算又有足够精度的近似计算公式^[4]:

$$Q_e = 2 - 4 \exp(-\rho \tan \beta) \left(\frac{\cos \beta}{\rho}\right) \sin(\rho - \beta) - 4 \exp(-\rho \tan \beta) \left(\frac{\cos \beta}{\rho}\right)^2 \cos(\rho - 2\beta) + 4 \left(\frac{\cos \beta}{\rho}\right)^2 \cos 2\beta \quad (10)$$

$$Q_a = 1 + \frac{\exp(-4xm_i)}{2xm_i} + \frac{\exp(-4xm_i) - 1}{8x^2m_i^2} \quad (11)$$

式中： $\rho = \frac{2\pi D}{\lambda}(m_r - 1)$ ； $\tan\beta = \frac{m_i}{m_r - 1}$ ， m_r 和 m_i 分别为复折射率的实部和虚部， λ 为波长。利用公式(10)、(11)和 Q_e 、 Q_s 、 Q_a 三者之间的关系，可以计算出其近似值，在对精度要求不高时是个不错的选择。

2 雨滴尺度分布

降雨是一种十分普遍的大气现象，通常人们用降雨量来描述雨的大小，例如，降雨量在 5 mm/h 时为小雨，大于 25 mm/h 时为暴雨。雨滴尺度分布 $N(D)$ 用来描述在一定降雨量的情况下，不同尺寸的雨滴在空间单位体积内的分布情况，单位为 $\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。研究降雨对远红外激光传输功率的影响，必须确定雨滴的尺度分布函数。

降雨是一个随机过程，并且不同季节、不同地点雨滴的尺度分布都不相同，目前国内外研究者提出了很多雨滴尺度分布函数。最早雨滴尺度分布是由 Wiesner 测量得到^[5]，随后 Laws 和 Parsons 等人测得了经典的 L-P 分布^[6]。Marshall 和 Palmer 等人结合 L-P 分布，提出了负指数模型，即 M-P 分布^[7]。Joss 等人将降雨分为毛毛雨、广延雨、暴雨三类^[8]，并针对每一类降雨类型给出了雨滴尺度分布函数。Weibull 分布^[9]给出了一个通用的雨滴尺度分布函数，适用于世界上任何一个地区。不同的雨滴尺度分布有着各自的优缺点，其中 Joss 分布和 Weibull 分布被认为比较准确^[1,31]。

2.1 Joss 分布

Joss 分布将降雨细分为三类：毛毛雨、广延雨、暴雨，并针对每一种降雨类型给出了雨滴分布函数。降雨的 3 种类型依据降雨量 R 来区分： $R < 5 \text{ mm/h}$ 时为毛毛雨， $5 \text{ mm/h} < R < 25 \text{ mm/h}$ 时为广延雨， $R > 25 \text{ mm/h}$ 时为暴雨^[10]。具体的分布函数如下^[10]：

$$N(D) = \begin{cases} 31\,000 \exp(-5.7R^{-0.21}D), & \text{毛毛雨} \\ 7\,000 \exp(-4.1R^{-0.21}D), & \text{广延雨} \\ 1\,400 \exp(-3.0R^{-0.21}D), & \text{暴雨} \end{cases} \quad (12)$$

式中： R 为降雨量； D 为雨滴直径。在计算消光系数时，根据降雨量确定降雨类型，选择对应的函数方程代入公式(1)便可求解。

2.2 Weibull 分布

降雨是一个随机过程，不同地域的雨滴尺度分布

存在着差别。目前大多数雨滴尺度分布都存在一定的地域局限性，即只能反映观测地的雨滴分布情况，而不能适用于世界上各个地区。Weibull 分布给出了一个适合世界各地的分布函数，具体表达式如下^[9]：

$$N(D) = N_0 \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{D}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-a\left(\frac{D}{\sigma}\right)^\eta\right] \quad (13)$$

较为常用的一种 Weibull 分布参数是由 Sekine 提出的，其中 $N_0 = 1000$ ， $\eta = 0.95R^{0.14}$ ， $\sigma = 0.26R^{0.42}$ ， R 是降雨量。

2.3 两种雨滴尺度分布的比较

如前文所述，Joss 分布根据降雨量的不同将雨分成了三类，Weibull 分布提出了适合全世界各地的分布函数。这两种分布被很多研究人员用来分析降雨对无线通信的影响。图 1 给出了不同降雨量条件下，两种分布的曲线。

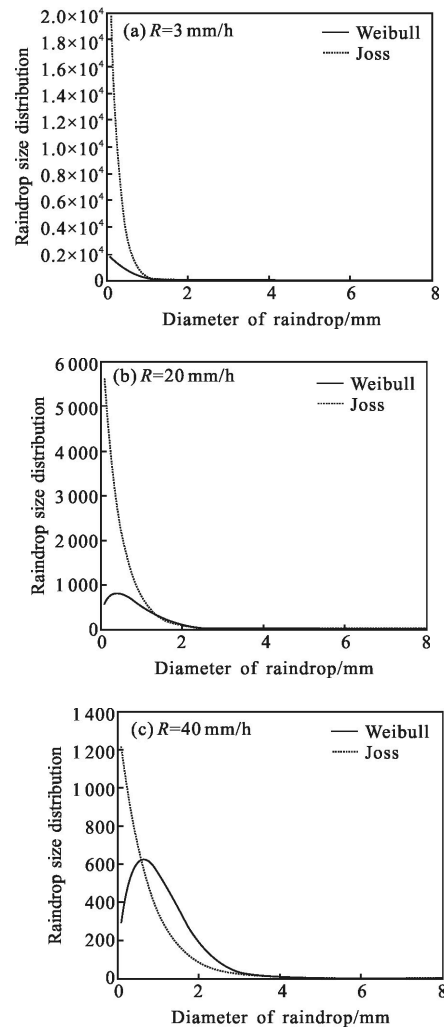


图 1 Weibull 分布和 Joss 分布

Fig.1 Weibull and Joss raindrop size distribution

从图 1 中可以看出:在不同的降雨量情况下,直径在 1 mm 以下的雨滴始终占大部分。随着降雨量增加,直径大于 1 mm 的雨滴数量略有增加。此外,在不同降雨量的情况下,Joss 分布和 Weibull 分布在对大雨滴的估计上基本相同,而在小雨滴的估计上,Weibull 分布比 Joss 分布小。宋博等人^[13]指出利用 Weibull 分布计算出的衰减偏小,这是由于 Weibull 分布对小雨滴数量估计不足导致的。而 Joss 分布在小雨、中雨、大雨情况下对雨滴谱的模拟较为准确,对雨衰减计算较为准确。因此,笔者利用 Joss 分布来分析降雨对红外激光传输的影响。

3 信道建模

分析远红外激光在雨中的传输损耗除了要选择合适的雨滴尺度分布函数,还需要建立贴合实际的信道模型。目前,研究光信号在大气中的功率衰减大多使用著名的朗伯-比尔定律。根据朗伯-比尔定律,光信号在大气传输中功率变化情况由下式给出^[11]:

$$\tau_a(L) = \frac{P_i(L)}{P_i(0)} = e^{-(k_a+k_s+k_e)L} = e^{-k_e L} \quad (14)$$

式中: $P_i(L)$ 和 $P_i(0)$ 分别表示激光在传输了距离 L 后的功率和激光光源处的功率; k_a 、 k_s 、 k_e 分别表示吸收、散射和消光系数。由公式(14)得到传输距离 L 后,链路损耗的表达式为:

$$\text{Loss(dB)} = 10 \log[\tau_a(L)] \quad (15)$$

朗伯-比尔定律假设所有的散射光都无法被接收机接收,并且也没有考虑光束发散角、接收视场角等实际工程应用所需要的参数,因此,具有一定的局限性。针对朗伯-比尔定律存在的不足,根据激光在大气中的散射特性,采用光子追踪法建立大气直视信道模型。

激光在大气中传输,其实就是光子与大气中的气溶胶粒子随机碰撞后发生散射的过程。如图 2 所示为利用光子追踪法描述光子在大气中传输的过程。发射端位于坐标系 (x_0, y_0, z_0) 的原点,接收端在此坐标系的 $(0, 0, r)$ 处。发送端激光器的光束发散角为 α_r ,接收端探测器的接收视场角为 α_R 。光子从激光器出射的初始方位角为 θ_0 ,随机迁移距离为 r_0 ,偏转角为 ϕ_0 。 O_i 为第 i 次的散射点,其散射的方位角、迁移距离和偏转角分别为 (θ_i, r_i, ϕ_i) 。

为了简化模型,假设光子在激光器的光束发散

角 α_r 内服从均匀分布,则光子初始的方位角和偏转角 (θ_0, ϕ_0) 的概率密度函数为^[12-13]:

$$f_i(\theta_0, \phi_0) = \begin{cases} \frac{\sin \theta_0}{2\pi[1-\cos(\alpha_r/2)]} & 0 \leq \theta_0 \leq \alpha_r/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

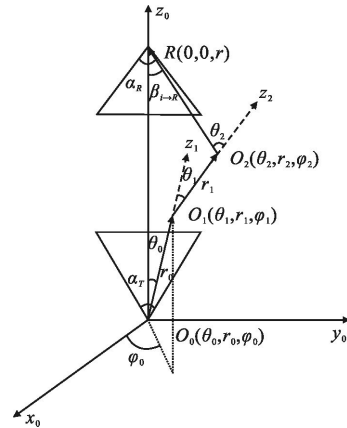


图 2 大气信道中光子传输示意图

Fig.2 Schematic diagram of photon transmission in atmospheric channel

光子离开发射端后以初始角度 (θ_0, ϕ_0) 在大气中迁移,迁移距离 r_i ,即在这段距离中光子既没有被吸收也没有被散射的概率密度函数为^[12-14]:

$$f_i(r_i) = k_e \exp(-k_e r_i) \quad (17)$$

由公式(17)可得光子迁移 r_i 的概率为:

$$P_r(r_i) = \exp(-k_e r_i) \quad (18)$$

光子在大气中传输时,可能没有与大气中的气溶胶粒子经历碰撞就到达了检测器,也有可能经历了若干次碰撞才到达检测器。光子与气溶胶粒子碰撞的结果是光子被气溶胶粒子散射出去或者被气溶胶粒子吸收,这两个事件之间是相互独立且服从二项分布的,其概率分别为 k_s/k_e 和 k_a/k_e 。光子与气溶胶粒子碰撞后发生的散射属于 Mie 散射,散射方向由散射相函数决定。由于 Mie 散射的散射相函数计算非常复杂,实际应用中一般采用 H-G 散射相函数来代替,其表达式如下^[12-13,15]:

$$f_{H-G}(\theta) = \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{1.5}} \quad (19)$$

式中: g 为不对称因子,取值范围 0.7~0.9。

在接收端检测器接收到的光子包括未经历碰撞直接到达的光子和经历了 i 次碰撞后到达的光子两部分。经历了 i 次碰撞后到达接收端的光子要想被

检测器检测到必须满足第 i 次散射点到检测器的迁移向量 $\vec{r}_{i \rightarrow R}$ 与发送端到接收端的向量 \vec{r} 之间的夹角小于检测器视场角的一半,即小于 $\beta_{i \rightarrow R} \leq \alpha_T/2$ 。定义函数 P_R 如公式(20)所示。由此可得光子在经历了 i 次碰撞到达接收端被检测器检测到的概率为^[12-13]:

$$P_R = \begin{cases} 1 & \beta_{i \rightarrow R} \leq \alpha_T/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

$$p_{i \rightarrow R} = \frac{k_s}{k_c} P_r(r_i) \cdot f_{H-G}(\theta_i) \cdot 2\pi [1 - r_i(r_i^2 + S/\pi)^{-1/2}] \cdot P_R \quad (21)$$

式中: S 为检测器的接收面积。

综上所述可以得到: 假设到达检测器的激光光斑面积小于检测器接收面积,即不存在几何损耗,光子经历 i 次碰撞被检测到的概率为^[13]:

$$P_i = \iint \dots \int f_T(\theta_0, \phi_0) f_r(r_0) \cdot \left[\prod_{n=1}^{i-1} \frac{k_s}{k_c} f_r(r_n) f_{H-G}(\theta_n) \right] \cdot p_{i \rightarrow R} d\Omega_0 \dots d\Omega_{i-1} dr_0 \dots dr_{i-1} \quad (22)$$

最后, 将每个光子被检测到的概率叠加起来与发送端的能量相乘就得到了接收到的能量, 即 $E_r = \sum_{i=0}^n P_i E_i$ 。由此可以得到激光在大气中的传输损耗, 如公式(23)所示^[12-13]:

$$L(\text{dB}) = 10 \lg \left(\frac{E_r}{E_t} \right) = 10 \lg \left(1 / \sum_{i=0}^n P_i \right) \quad (23)$$

以上就是利用光子追踪法建立的大气直视信道模型, 并得出了激光在大气中的传输损耗表达式。由于损耗表达式中含有多重积分无法得到数值解, 因此使用蒙特卡洛方法对其进行数值计算。

4 仿真结果分析

前文已经介绍了激光在雨中消光系数的计算方法和两种雨滴尺度分布, 此节将利用 Matlab 软件对远红外激光在雨中的消光系数和链路损耗进行仿真。其中波长选用 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$, 折射率 $m=1.185 - i0.0662$ ^[16]。

4.1 雨中的消光系数

利用公式(1), 分别将 Joss 分布和 Weibull 分布代入, 便可计算出两种分布对应的消光系数。观察公式(12)、(13)不难看出, 雨滴尺度分布与降雨量有关, 相应的雨中的消光系数也和降雨量有关。图 3 给出了不同降雨量情况下雨中消光系数的变化情况。

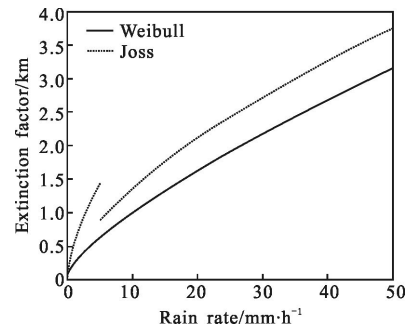


图 3 消光系数与降雨量的关系

Fig.3 Relationship of extinction factor and rain rate

如图 3 所示, 随着降雨量的增加, 消光系数逐渐增大。比较两种分布不难发现: 在不同降雨量的情况下, Weibull 分布的消光系数都要小于 Joss 分布, 这是由于在对小雨滴的估计上 Weibull 分布比 Joss 分布少, 如图 1 所示。

4.2 雨中的链路损耗

利用 Matlab 软件, 根据朗伯-比尔定律和光子追踪法分别对链路损耗进行仿真。其中, 消光系数 k_c 利用公式(1)计算, 雨滴尺度分布选用 Joss 分布, 光束发散角为 0.01° , 接收视场角为 2° 。仿真结果如图 4 所示。从图 4 可以看出: 当距离比较短时, 散射能量较强, 由于朗伯-比尔定律忽略了散射能量带来的贡献, 因此, 链路损耗大于光子追踪法得到的结果。当距离变长, 散射能量减弱, 对接收端接收功率的影响降低, 两条曲线基本一致。

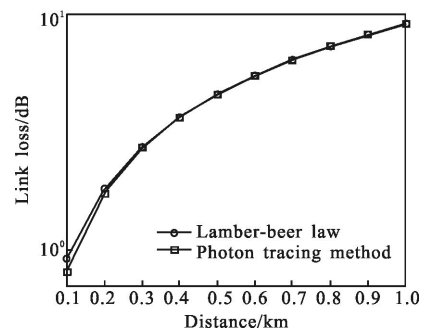


图 4 降雨量为 20 mm/h 时的链路损耗

Fig.4 Link loss at $R=20 \text{ mm/h}$

5 结论

激光在雨中传输时, 受到雨滴散射的影响, 导致激光功率产生衰减。文中利用 Mie 散射理论和雨滴尺度分布函数, 对雨中的消光系数进行计算。通过观

察降雨量和消光系数之间的关系,得出消光系数随降雨量的增加而增大的结论。此外,采用光子追踪法对光子在大气中的传输进行建模,利用蒙特卡洛方法进行仿真,计算激光在雨中传输时的链路损耗,并将所得结果与朗伯-比尔定理进行比较。比较发现,由于朗伯-比尔定理忽略了散射能量、光束发散角、接收视场角等一系列实际应用中的因素,导致由朗伯-比尔定理计算出的链路损耗要大于光子追踪法计算得到的结果。因此,后者更加贴近实际,结果更加精确。

参考文献:

- [1] Zhu Yaolin, An Ran, Ke Xizheng. Effect of rainfall on wireless laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 32(12): 72-76. (in Chinese)
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, 2013, 32(12): 72-76.
- [2] Ke Xizheng, Yang Lihong, Ma Dongdong. Transmitted attenuation of laser signal in rain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 37(6): 1021-1024. (in Chinese)
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, 2009, 37(6): 1021-1024.
- [3] 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. (in Chinese)
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.
- [4] Wei Heli, Liu Qinghong, Song Zhengfang, et al. Extinction of infrared radiation by rain [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1997, 16(6): 418-424. (in Chinese)
魏合理,刘庆红,宋正方,等. 红外辐射在雨中的衰减[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(6): 418-424.
- [5] Oguchi T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(9): 1029-1078.
- [6] Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop-size to intensity [J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1943, 24: 452-460.
- [7] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size[J]. *Journal of Meteorology*, 1948, 5(4): 165-166.
- [8] Joss J, Gori E G. Shapes of raindrop size distributions[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1978, 17(7): 1054-1061.
- [9] Jiang H, Sano M, Sekine M. Weibull raindrop-size distribution and its application to rain attenuation [C]// *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, IET*, 1997, 144(3): 197-200.
- [10] Qiu Shengbo, Chen Jinghua. The distribution of raindrop sizes in Guangzhou [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1995, 10(4): 73-77. (in Chinese)
仇盛柏,陈京华. 广州雨滴尺寸分布 [J]. 电波科学学报, 1995, 10(4): 73-77.
- [11] Bielecki Z, Mikolajczyk J, Nowakowski M, et al. Free-space optics second generation [C]// *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2008, International Society for Optics and Photonics*, 2008: 712401I-6.
- [12] Cong Rijin, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong, et al. Long wave infrared transmission in atmospheric channel[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 927-932. (in Chinese)
丛日进,汪井源,徐智勇,等. 长波长红外大气信道传输 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 927-932.
- [13] Cong Rijin, Wang Jingyuan, Wang Rong, et al. Study on the attenuation of near middle and far infrared transmission in fog[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 42-47. (in Chinese)
丛日进,汪井源,王荣,等. 近中远红外光在雾中的传输损耗研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 42-47.
- [14] Robert J Drost, Terrence J Moore, Brian M Sadler. UV communications channel modeling incorporating multiple scattering interactions [J]. *Optical Society of America*, 2011, 28(4): 686-695.
- [15] Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K, et al. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1535-1544.
- [16] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200 wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3): 555-563.