

文章编号 1004-924X(2014)10-2652-07

## 雨滴在船舶大气激光通信中的遮挡作用

汪亭玉<sup>1\*</sup>, 陈家璧<sup>2</sup>

(1. 江苏海事职业技术学院 轮机工程系, 江苏 南京 211170;

2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:**虽然气候因素和大气本身对船舶大气激光通信系统的性能影响极大,但现有的研究多集中于讨论大气对激光束造成的散射衰减。本文指出在雨中的自由空间光通信主要受雨滴直接遮挡的影响,尤其是雨滴形成的投影间的重叠效应,该效应能够很好地解释大雨甚至暴雨中激光仍能通过的现象。文中结合雨滴尺寸分布模型,建立了船舶大气激光通信中雨滴遮挡作用的数理模型,对光在雨中的最大传输距离及其光强的衰减做了初步计算与实验。结果证明,该衰减模型是合理的,理论模型基本符合实验结果。该项研究为进一步探索船舶大气激光通信系统的性能奠定了基础。

**关键词:**船舶大气激光通信;韦布分布模型;雨滴衰减模型;统计分析;重叠效应

**中图分类号:**TN929.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2652

## Shading effect of rain drops in ship free space laser communication

WANG Ting-yu<sup>1\*</sup>, CHEN Jia-bi<sup>2</sup>

(1. Marine Engineering Department, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211170, China;

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

\* Corresponding author, E-mail: 13913969243@163.com

**Abstract:** Weather conditions and atmosphere have greater influence on the free space Atmospheric Laser Communication (ALC) between the ships. However, most of the research work focus on the discussion on the scattering attenuation of laser beams caused by atmospheric effects. This paper points out that the free space laser communication in raining is influenced by the blotting-out effect of the rain drops mainly, especially the overlapping effect between the projecting areas of rain drops on a receiver. By which, the phenomena that the ALC is achieved within a certain distance in heavy rains is well explained. Based on the raindrop size distribution, a mathematical model of the attenuating effect of rain's blotting-out on the ALC is presented, and the transmitting distance of ALC and the attenuation of the light intensity are calculated. The results show that the model is reasonable and results of the model is coincided basically with that of the experiments. The obtained results provides a basis for research of the performance of ship free space laser communication.

收稿日期:2014-01-20;修订日期:2014-02-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61177043)

**Key words:** ship atmospheric laser communication; Weibull distribution model; rainfall attenuation model; statistical analysis; overlap effect;

## 1 引言

无线电通信具有传递数据快,传递距离大等优点,因此是船舶之间使用比较普遍的通信手段,但其保密性比较差,容易被窃听和干扰。大气激光通信可以弥补这种缺陷,它是以激光为信息载体、大气为传输介质的一种无线通信方式,但是其性能易受气候因素和大气本身的影响,大气本身以及其中的尘埃、大气溶胶、雾和雨滴,都会对激光束造成不同程度的衰减。目前,关于前几种情况的研究相对比较多,而雨天中雨滴对光传输遮挡作用的研究相对较少。

当电磁波波长与粒子尺寸可比拟时会产生米氏散射,其散射场分布可用米氏散射理论来求解<sup>[1]</sup>。不过雨滴的半径为 0.1~5 mm,远大于可见光波长,因此用米氏散射理论来计算雨滴对可见光波的衰减并不合适。T. S. Chu<sup>[2]</sup>和 C. J. Gibbins<sup>[3]</sup>等人基于米氏散射理论的研究表明,不同散射方法预测激光在雨中的传输衰减时会出现较大偏差。1920年, Preston<sup>[4]</sup>进行该项研究时仅考虑雨滴对光传输的遮挡作用,反而得到了与实际情况比较符合的结果,这是因为散射光场分布在长距离传输后产生的光强可以忽略不计。但是 Preston 的模型没有考虑到雨滴的尺寸分布特性。本文详细研究了雨滴的尺寸分布特性,并在 Preston 模型的基础上建立了一种相对准确的传输衰减模型。

## 2 雨滴的尺寸分布特性

雨滴的尺寸分布情况对于研究光波在雨中的传输衰减非常重要。雨滴的尺寸分布特性(Drop Size Distribution, DSD)主要受其最终下落速度的影响。在雨滴从云中落向地面的过程中,当重力和阻滞力相等时雨滴做匀速运动,这时雨滴的速度称为最终下落速度。较小雨滴的最终下落速度可用斯托克斯定律模拟<sup>[5]</sup>,然而比较全面的雨滴最终下落速度模型<sup>[6]</sup>为:

$$v(D) = \begin{cases} 28D^2, & D \leq 0.074 \text{ mm} \\ 4.5D - 0.18, & 0.075 \text{ mm} < D < 0.5 \text{ mm} \\ 4.0D + 0.07, & 0.5 \text{ mm} < D < 1.0 \text{ mm} \\ -0.425D^2 + 3.695D + 0.8, & 1.0 \text{ mm} < D < 3.6 \text{ mm} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $v(D)$  为雨滴的最终下落速度,  $D$  为雨滴直径。从物理意义上理解,  $v(D)$  表示的函数应当是连续的且其一阶导数不会跳变,因此式(1)只是对实验结果的一个比较精确的拟合,并不是一个完全准确的表达式。

降雨时,雨滴的尺寸各不相同。建立雨滴的尺寸分布函数时,首先根据世界各地的多场降雨,按尺寸分布统计出雨滴的数目。然后用测量统计结果拟合出一个连续的雨滴尺寸分布函数  $N(D)$ ,  $N(D)dD$  表示单位体积内直径在  $D$  和  $(D+dD)$  之间的雨滴数目。任取雨滴直径的某一区间  $(a, b)$ , 则单位体积内直径位于区间  $(a, b)$  的雨滴数目为  $\int_a^b N(D)dD$ 。任意给定  $a, b$  的值并将一个雨滴的尺寸分布函数代入上面的积分式,算得的雨滴数目值很可能不是整数。

现有的雨滴尺寸分布函数即雨滴尺寸分布模型有许多,其中 Laws-Parsons 模型<sup>[7]</sup>、Marshall-Palmer 模型<sup>[8]</sup>以及 Waldvogel 模型<sup>[9]</sup>等过高估计了较小雨滴的数量;而 Joss-Gori 指数模型<sup>[10]</sup>则不能准确估计较大雨滴的数量。文献<sup>[11]</sup>指出 Park 模型<sup>[12]</sup>、Ulbrich 模型<sup>[13]</sup>和韦布分布模型<sup>[14]</sup>比较精确,可以用来计算雨滴的衰减,而且韦布分布模型有一个通用形式,适用于世界上大部分地区。其具体表达式为<sup>[11,14]</sup>:

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

其中:  $D$  表示雨滴直径;  $M_g(D)$  表示每平方米的地面上、每秒钟落下的直径为  $D$  的雨滴总数;  $M_{gt}$  表示每平方米地面上落下的雨滴总数量,它的一个经验表达式为:  $M_{gt} = 154 \sqrt{R}$ ,  $R$  表示降雨量;  $D_0 = aR^b \exp(-cR)$ , 为雨滴的平均直径,其中  $a, b, c$  是参数,它们的取值与地理位置有关,较常见的取值为:  $a=0.941, b=0.336, c=0.471 \times 10^{-2}$ 。

雨滴尺寸的分布函数  $N(D)$  是雨滴数目随雨滴直径的变化规律, 用单位体积内直径在  $D$  和  $(D+dD)$  之间的雨滴数目来近似; 但这个数量无法直接测得, 只能先测  $M_g(D)$ , 再用  $M_g(D)$  除以雨滴的最终下落速度  $v(D)$ , 进而间接求得  $N(D)$ , 即:

$$N(D) = M_g(D) / v(D) \quad (3)$$

本文的所有计算都采用雨滴韦布分布模型的通用形式。

### 3 雨滴的遮挡作用导致光传输衰减的原理及相关计算

#### 3.1 不考虑雨滴投影圆之间的重叠效应建立的光传输衰减模型

Preston<sup>[4]</sup> 的模型除了没有考虑到雨滴的尺寸分布特性以外, 还没有考虑雨滴所形成投影圆之间的重叠效应, 因此本文考虑雨滴的尺寸分布特性对该模型进行了改进。

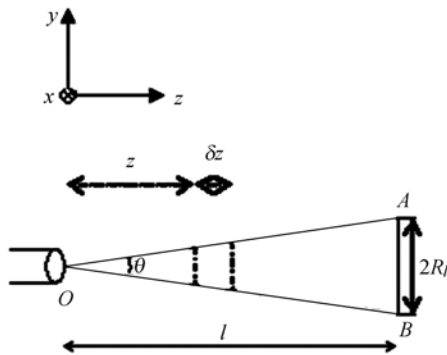


图 1 激光传输示意图  
Fig. 1 Sketch map of laser transmission

如图 1 所示, 大气激光通信的传输距离  $l$  比较远, 所以把激光源看作点光源  $O$ , 以  $O$  为原点建立三维坐标系。  $AB$  表示圆形接收透镜的直径,  $\theta$  表示  $O$  对  $AB$  的张角, 设接收透镜的孔径面积为  $S_r$ , 则  $S_r = \pi R_l^2 = \pi(l\theta)^2/4$ 。圆锥体  $OAB$  内的雨滴在光照下向接收圆内投影, 假设雨滴为球形, 先不考虑雨滴形成的投影圆之间的重叠效应, 图 1 中位于  $z$  处的一个直径为  $D$  的雨滴所形成的投影圆的面积为  $\frac{\pi}{4} \left(\frac{lD}{z}\right)^2$ , 圆台形体积微元  $\delta z$

的体积为  $\pi(z\theta)^2 \delta z/4$ 。由第 2 节可知  $N(D)dD$  表示每立方米空气中直径在  $D$  和  $(D+dD)$  之间的雨滴数目, 因此  $\delta z$  体积微元内所有雨滴形成的投影圆的面积之和为:

$$S_{\text{total}} = \int_0^\infty \frac{\pi}{4} (z\theta)^2 \delta z N(D) \frac{\pi}{4} \left(\frac{lD}{z}\right)^2 dD$$

或者

$$\int_0^\infty \frac{\pi}{4} (z\theta)^2 \delta z N(D) \frac{\pi}{4} \left(\frac{lD}{z}\right)^2 dD.$$

$S_{\text{total}}$  即为微元内雨滴对光照的遮挡总面积。将整理后的上式视为被积表达式,  $z$  为积分变量, 在整个路径  $l$  上对  $z$  积分后得到圆锥体  $OAB$  内所有雨滴对圆形接收透镜总的遮挡面积  $S_p$ , 这个遮挡面积也等于雨滴形成投影圆的面积总和, 即:

$$S_p = \frac{\pi l S_r}{4} \int_0^\infty N(D) D^2 dD, \quad (4)$$

式中:  $l$  为激光的传输距离,  $S_r$  的单位是  $\text{m}^2$ 。为统一单位, 将式(4)转化为:

$$\frac{S_p}{S_r} = \frac{\pi l}{4} \times 10^{-6} \int_0^\infty N(D) D^2 dD. \quad (5)$$

当  $S_p/S_r = 1$  时, 光全部被遮挡而不能到达接收透镜, 此时激光达到最大传输距离  $l_{\text{max}}$ :

$$l_{\text{max}} = \frac{1}{\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \int_0^\infty N(D) D^2 dD}. \quad (6)$$

采用雨滴的韦布分布模型, 联立式(1)、(2)、(3)、(6)可得光的最大传输距离  $l_{\text{max}}$  关于降雨量  $R$  的函数关系式, 如图 2 所示。

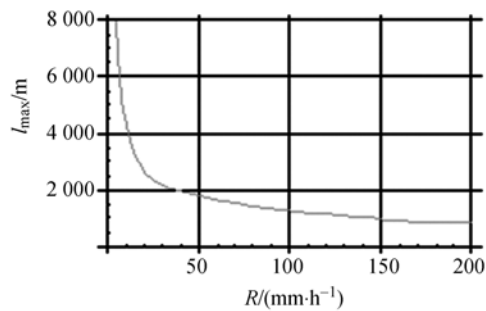


图 2 光最大传输距离与降雨量之间的关系曲线  
Fig. 2 Relationship between maximum transmission distance and rainfall rate

当降雨量为  $10 \text{ mm/h}$  时, Preston<sup>[4]</sup> 假定雨滴的大小一样, 算得  $l_{\text{max}}$  为  $7 \text{ km}$ 。而考虑雨滴的大小及其空间分布后, 得到的  $l_{\text{max}}$  为  $4.3 \text{ km}$ 。实

际情况是,晴天或无雨雾天气下,光的最大传输距离可以达到 8 km 左右,而小雨时光的最大传输距离一般在 4 km 左右<sup>[15]</sup>,因此 4.3 km 是一个较为合理的结果。

由此求得光在传输 1 km 后其能量(即功率)的衰减  $\gamma_R$  如图 3 所示。由图 3 可知,当降雨量在 140~150 mm/h 时,曲线直线上升,这表明此时光已不能传输,与实际情况不符,因此有必要讨论雨滴投影圆之间的重叠效应的影响。

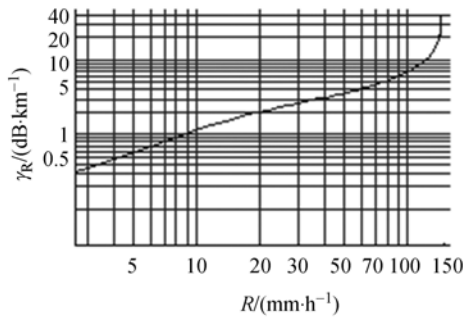


图 3 光能量衰减量与降雨量之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between optical power attenuation and rainfall rate

### 3.2 考虑雨滴投影圆之间的重叠效应建立的光传输衰减模型

随着降雨量的增大,空间中的雨滴数量将急剧增加,雨滴形成的投影圆在圆形接收面上重叠的概率将明显增大,这些重叠对光传输遮挡效应的影响是不可以忽略的。

如图 1 所示,如果一个雨滴离激光光源 O 足够近,那么它可能会完全遮挡住接收透镜,但这种完全遮挡的情况所发生的概率非常小,以至于可以忽略。因此假设参与遮挡的雨滴都位于圆锥体 OAB 内(忽略边缘的情况),这些雨滴所形成的投影圆都包含在圆形接收平面内,且这些投影圆的半径都小于接收圆的半径。

圆形接收透镜的半径为  $R_1$ ,根据韦布分布模型求得圆锥体 OAB 内雨滴的数目及分布。令  $V_c$  为圆锥体 OAB 的体积,则:

$$V_c = \pi R_1^2 l / 3. \quad (7)$$

雨滴的直径一般为 0~3.6 mm,将此区间分成  $k$  ( $k$  为正整数)个长度相等的子区间。 $k$  的取值会影响计算精度, $k$  越大则精度越高,然而  $k$  大到一定程度后精度将保持在一个小范围内基本不

变。假设  $k$  为 36,即将雨滴区间分成 36 个长度为 0.1 mm 的子区间。以第一个子区间(0, 0.1)为例,这个子区间对应的圆锥体 OAB 内的雨滴数为:

$$n_1 = \int_0^{0.1} V_c N(D) dD. \quad (8)$$

同理可算出其他 35 个子区间的雨滴数,由第 2 节的叙述可知,这 36 个子区间所对应的雨滴数  $n_i$  ( $i=1, 2, \dots, 36$ )很可能都不是整数。为了方便运算,把各个子区间包含的所有雨滴的直径均近似看作此子区间的中值。以第一个子区间为例,即令直径在 0~0.1 mm 的所有雨滴的直径均为 0.05 mm,其他 35 个子区间也做同样的处理。结合雨滴的韦布分布模型并利用计算机算得各子区间包/含的雨滴个数  $n_i$  ( $i=1, 2, \dots, 36$ ),  $n_i$  一般都不是整数。以第  $i$  个子区间为例,设  $D_i$  是此子区间的中值,则该子区间内所有雨滴的直径均近似看作等于  $D_i$ 。以此子区间内的任意一个雨滴为例,它的直径等于  $D_i$ ,如图 1 所示,这个雨滴在圆锥体 OAB 内服从均匀分布,因此它出现在圆台形体积微元  $\delta z$  内的概率为:

$$P\{z < Z \leq z + \delta z\} = V_{\delta z} / V_c = \pi (z R_1 / l)^2 \delta z / V_c = 3 z^2 \delta z / l^3. \quad (9)$$

当这个雨滴位于此微元内时,雨滴的  $z$  轴坐标可以认为是同样的。根据概率密度的定义,若不计高阶无穷小,有:

$$P\{z < Z \leq z + \delta z\} = f(z) \times \delta z. \quad (10)$$

于是此雨滴  $z$  轴坐标的概率密度函数为:

$$f(z) = \frac{3z^2}{l^3}, \quad 0 \leq z \leq l. \quad (11)$$

当雨滴的  $z$  轴坐标一定时,对应的雨滴投影圆半径为:

$$R_i = \frac{l D_i}{2z}, \quad 0 \leq z \leq l. \quad (12)$$

此雨滴投影圆的面积  $S_i$  为:

$$S_i = \pi R_i^2 = \pi \left( \frac{l D_i}{2z} \right)^2, \quad 0 \leq z \leq l. \quad (13)$$

因此  $S_i$  具有的概率密度函数为:

$$g(S_i) = f\{z(S_i)\} (z(S_i))' = 3\pi^{\frac{3}{2}} D_i^3 S_i^{-\frac{5}{2}} / 16, \quad \pi D_i^2 / 4 \leq S_i \leq \infty. \quad (14)$$

进而  $S_i$  的数学期望为:

$$E(S_i) = \int_{\frac{\pi D_i^2}{4}}^{\infty} g(S_i) S_i dS_i = 3\pi D_i^2 / 4. \quad (15)$$

由此得到该雨滴投影圆半径的数学期望

$E(R_i)$ 为:

$$E(R_i) = \frac{\sqrt{3}}{2} D_i \quad (16)$$

同理对其他子区间的雨滴进行相关计算。雨滴投影如图 4 所示,  $O'$  表示圆形接收透镜的中心。

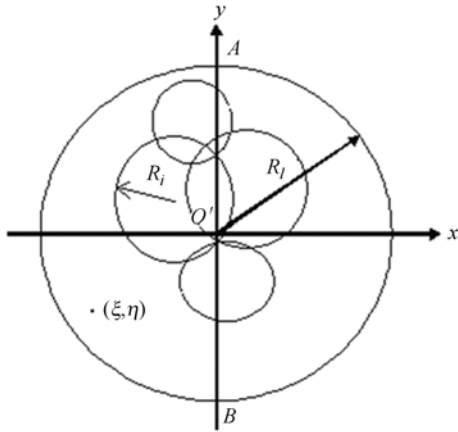


图 4 雨滴投影示意图  
Fig. 4 Sketch map of raindrop projection

对于第  $i$  个子区间任意一个雨滴来说, 它可以出现在圆锥体  $OAB$  内的任意位置。从概率角度看, 它最终在圆形接收平面上形成的投影圆的半径有一个确定的期望值  $E(R_i)$ , 此投影圆的面积也有一个确定的期望值  $E(S_i)$ , 假设雨滴的投影过程统计独立, 则这个具有固定大小的投影圆的圆心  $O_i(x_i, y_i)$  在圆形接收平面上服从均匀分布, 其概率密度函数为:

$$f(x_i, y_i) = 1/(\pi R_i^2), \quad x_i^2 + y_i^2 \leq R_i^2 \quad (17)$$

对于圆  $O'$  内的任意一点  $(\xi, \eta)$ , 有:

$$P\{\text{点}(\xi, \eta)\text{被覆盖} | \text{投影圆落在点}(x_i, y_i)\text{处}\} = \begin{cases} 1, & (x_i - \xi)^2 + (y_i - \eta)^2 \leq [E(R_i)]^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

于是点  $(\xi, \eta)$  被此投影圆所覆盖的概率为:

$$P(\xi, \eta, x_i, y_i) = \iint_{(\xi-x_i)^2 + (\eta-y_i)^2 \leq [E(R_i)]^2} \frac{1}{\pi R_i^2} dx_i dy_i = E(S_i)/S_r = [E(R_i)/R_r]^2 \quad (19)$$

式中:  $S_r$  表示接收圆的面积。点  $(\xi, \eta)$  不被此投影圆所覆盖的概率为  $[1 - P(\xi, \eta, x_i, y_i)]$ , 如果第  $i$  个子区间共有  $n_i$  个雨滴, 这  $n_i$  个雨滴的半径均为  $E(R_i)$ , 它们形成的  $n_i$  个投影圆(半径均为  $E(R_i)$ )统计独立地投影在圆形接收平面内, 则点

$(\xi, \eta)$  不被其中任何一个投影圆所覆盖的概率为  $[1 - P(\xi, \eta, x_i, y_i)]^{n_i}$  ( $i=1, 2, \dots, 36$ )。这一结论适用于每一个子区间, 由于各个子区间内所有雨滴的投影过程都是统计独立的, 因而点  $(\xi, \eta)$  不被 36 个子区间内所有雨滴(即圆锥体  $OAB$  内包含的所有雨滴)形成的投影圆所覆盖的总概率为:

$$P\{\text{点}(\xi, \eta)\text{不被覆盖}\} = \prod_{i=1}^{36} [1 - P(\xi, \eta, x_i, y_i)]^{n_i} = \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{E(S_i)}{S_r}\right]^{n_i} \quad (21)$$

对于不被覆盖的点, 光都可以传输到达, 故有:

$$P\{\text{点}(\xi, \eta)\text{处光能通过}\} = \prod_{i=1}^{36} [1 - P(\xi, \eta, x_i, y_i)]^{n_i} = \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{E(R_i)}{R_r}\right]^{n_i} \quad (22)$$

由点  $(\xi, \eta)$  的任意性可知, 接收圆内任意一点处光通过的概率都是相同的。令激光源产生的初始光通量为  $\Phi$ , 假设传输路径上只有雨滴的衰减, 没有大气中其他因素的衰减, 则所得到的接收圆内的光通量  $\tilde{\Phi}$  的期望值为:

$$E[\tilde{\Phi}] = \Phi \times P\{\text{点}(\xi, \eta)\text{处光能通过}\} = \Phi \times \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{E(S_i)}{S_r}\right]^{n_i} = \Phi \times \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \left(\frac{E(R_i)}{R_r}\right)^2\right]^{n_i} \quad (23)$$

将式(16)代入式(23), 最终得到圆形接收透镜口径中通过的光通量的数学期望值为:

$$E[\tilde{\Phi}] = \Phi \times \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{E(S_i)}{S_r}\right]^{n_i} = \Phi \times \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{3D_i^2}{4R_r^2}\right]^{n_i} \quad (24)$$

令传输距离  $l$  为 1 km, 得到雨滴引起的衰减为:

$$\gamma'_R = \left| 101g \left\{ \frac{E[\tilde{\Phi}]}{\Phi} \right\} \right| = \left| 101g \left\{ \prod_{i=1}^{36} \left[1 - \frac{3D_i^2}{4R_r^2}\right]^{n_i} \right\} \right| \quad (25)$$

基于雨滴韦氏分布模型的  $\gamma'_R$  的数值解如表 1 所示。表 1 显示的雨滴衰减理论值与实验得到的衰减实验值基本吻合。

实验在 2005 年 3 月 1 号至 11 号期间连续地进行, 传输距离为 660 m, 激光器的发射功率为 12 mW, 环境温度在 4~17 °C。气象以阴雨天气为主, 期间有中到大雨, 9 号至 11 号有中雾、大雾、浓雾并伴有中到大雨。实验中很难区分毛毛雨(或雾)与小雨, 然而在数次比较大的降雨中, 降雨

表 1 激光能量衰减  $\gamma'_R$  随降雨量  $R$  的变化情况  
( $R_l=30$  mm,  $l=1$  km)

Tab.1 Numerical values of optical power attenuation as a function of rain rate ( $R_l=30$  mm,  $l=1$  km)

$R/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$\gamma'_R/(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})$
5	0.551
10	1.015
20	1.626
30	1.984
50	2.462
70	2.871
100	3.488
140	4.286
150	4.460
200	4.989

量相对稳定且约为 50 mm/h,测得的衰减值为 3.1 dB/km,这一值大于 660 m 对应的理论值 1.750 dB/km,这是因为降雨的同时伴随有雾及潮湿空气。雾和潮湿空气也会带来衰减,它们的衰减有时会相当大以至于取代雨成为占支配地位的衰减因素<sup>[16]</sup>。除了 50 mm/h 的降雨量外,其他降雨量造成衰减的理论值也都小于实验值,两者的差距随着降雨量的增大有略微上升的趋势,这些数据在此不一一列出。

#### 参考文献:

- [1] MIE G. Beitrage zur optik trüber medien, spellzien kolloidaler metallosungen [J]. *Ann. Physik*, 1908, 25: 377-445.
- [2] CHU T S, HOGG D C. Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1968, 47: 723-759.
- [3] VASSEUR H, GIBBINS C J. Prediction of apparent extinction for optical transmission through rain [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(36): 7144-7150.
- [4] PRESTON F W. Visibility of landscape during rain [J]. *Nature*, 1920, 106: 343-344.
- [5] ACHOUR M. Simulating atmospheric free-space optical propagation: part I, rainfall attenuation [J]. *SPIE*, 2002, 4635: 192-201.
- [6] GUNN R, KINZER G D. Terminal velocity of wa-

## 4 结 论

本文对雨滴对激光通信系统的直接遮挡作用进行了研究。实际上,激光通信传输的距离比较远,接收透镜的接收角非常小,被雨滴散射的激光向四面八方传播,这部分光能将很快衰减为零,因而各种散射效应实际上基本等效于直接遮挡作用。把雨滴对光传输的衰减作用看作是它对球面光波传输的遮挡,就能较为准确地得到雨滴对光传输的影响。另外,强调雨滴形成的投影圆之间的重叠效应尤为重要,因为它能够很好地解释大雨甚至暴雨中激光仍能通过的现象。然而在考虑重叠效应的模型下所得到的衰减结果比实验结果小,大降雨量时这种误差更为明显,这主要是因为本文仅考虑了大尺寸雨滴造成的衰减,并未把雾以及潮湿空气造成的衰减计算在内。因此,表 1 作为反映大尺寸雨滴衰减作用的理论数据是符合实际情况的。

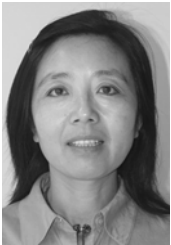
降雨作为一种随机现象,运用统计分析法分析更加符合实际规律。但是,作为运用统计分析的研究工作,本文还有待进一步深入研究,从而得到更为准确的结果。

ter droplets in stagnant air [J]. *J. Meteoro.*, 1949, 6(4): 243-248.

- [7] LAWS J O, PARSONS D A. The relationship of raindrop size to intensity [J]. *Trans. Am. Geophys. Union*, 1943, 24: 452-460.
- [8] MARSHALL J S, PALMER W M. The distribution of raindrops with size [J]. *J. Meteoro.*, 1948, 5: 165-166.
- [9] WALDVOGEL A. The jump of raindrops spectra [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31: 1067-1078.
- [10] JOSS J, GORI E G. Shape of raindrop size distribution [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1978, 17: 1054-1061.
- [11] BRUSSAARD G, WATSON P A. *Atmospheric Modeling and Millimeter Wave Propagation*[M]. London: Chapman & Hall, 1995: 285-296.
- [12] PARK S W, MITCHELL J K, BUBENZER G D.

- Rainfall characteristics and their relation to splash erosion [J]. *Trans. ASAE*, 1983, 26(30): 795-804.
- [13] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution [J]. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 1983, 22: 1764-1775.
- [14] ASSULINE S, MUALEM Y. The similarity of regional rainfall: a dimensionless model of drop size distribution [J]. *Trans. ASAE*, 1989, 32(4): 1216-1222.
- [15] GIOC-2MT 超长距无线激光通信传输设备[Z/OL]. <http://www.gioc.com.cn/>. GIOC-2MT super long wireless laser communication equipment [Z/OL]. <http://www.gioc.com.cn/>. (in Chinese)
- [16] WILSON R W. Effect of precipitation on transmission through the atmosphere [J]. *Nature*, 1966, 211:1081

作者简介:



汪亭玉(1955—),女,江苏南京人,教授,1982年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事船舶机械制造、管理、机械测量、控制,船舶之间通讯等方面的教学和研究。E-mail: 13913969243@163.com

(本栏目编辑:曹 金)  
(版权所有 未经许可 不得转载)