

## 532 nm 激光在雨中传输衰减模型的改进及实验

魏 朕<sup>1</sup>, 沈 娜<sup>1</sup>, 张祥金<sup>2</sup>

- (1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 机械学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 目前国内外研究激光在雨中传输的衰减问题时主要有两种模型: 散射模型和遮挡模型。但是遮挡模型在处理位于激光器视场近端的大尺寸雨滴时存在理论缺陷, 而散射模型对于视场远端的雨滴多次散射问题的计算量过于庞大。提出了一种基于接收端雨滴投影圆面积判据的雨滴衰减模型改进算法, 对接收透镜视角内出现单个雨滴全遮挡的情况进行了修正。并且采用 MATLAB 对模型进行了仿真分析, 得到改进的衰减模型与散射模型和遮挡模型的衰减曲线对比图。最后, 通过自然雨场实验验证改进理论算法的精确度, 结果表明: 传输距离在 100 m 且降雨量为 1.2 mm/h 时, 改进的理论模型相比较原遮挡模型精度提高了 54.6%, 说明上述改进算法能够提高雨滴衰减模型的精确性。该项目的研究为蓝绿激光大气通信探测技术的发展提供了一定的理论支撑。

**关键词:** 激光大气通信; 雨滴散射; 衰减模型; 高斯光束

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1106004

## Experimental research and improved algorithm in attenuation model of rain transmission of laser at 532 nm

Wei Zhen<sup>1</sup>, Shen Na<sup>1</sup>, Zhang Xiangjin<sup>2</sup>

- (1. Nation Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** At present, there are two models applied in the study at home and abroad in an attenuation model of rain transmission, which are scattering model and shading effect model. However, the shading effect model has a theoretical defect in dealing with large-sized raindrops located near the laser field of view, and the scattering model requires an enormous amount of computation caused by the multi-scattering problem at the far end of the field of view. This paper presented an improved algorithm for the raindrop attenuation model which was based on projected area of raindrops at receiver. The algorithm corrected the case when a single raindrop was obscured within the viewing angle of the receiving lens. The model was simulated by MATLAB, and the attenuation correlation curves of the improved attenuation model, the scattering model and the shading effect model were obtained. Finally, the accuracy

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 武器装备预研基金项目(9140c300106150c30001); 中央高校基本科研业务费专项(30915011334)

作者简介: 魏朕(1990-), 男, 硕士生, 主要从事无线光通信和测控技术等方面的研究。Email: 18762685775@163.com

导师简介: 沈娜(1979-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事智能检测系统及信号处理技术等方面的研究。

Email: snbox@njjust.edu.cn

of the improved algorithm was verified by the natural rain field experiment. The results show that compared with the shading effect model, the accuracy of improved model is improved by 54.6% when the transmission distance is 100 m and the rainfall rate is 1.2 mm/h. It is shown that the improved algorithm can improve the accuracy of the raindrop attenuation model. The research of the project provides a theoretical support for the development of the blue green laser atmospheric communication detection technology.

**Key words:** laser atmospheric communication; raindrop scattering; attenuation model; Gaussian beam

## 0 引言

大气信道会对激光的传输产生衰减,这是高速率空间激光探测通信的技术难点之一。降雨作为近地大气中最为常见的现象,随机分布的雨滴颗粒对自由空间激光通信链路造成的衰减很大,所以对其进行专项研究是解决激光大气传输衰减难题的重要环节。目前国内外对激光在雨中传输的衰减特性研究已经取得了一定的成果。例如 Samir A. Al-Gailani 等人基于国际电信联盟无线电通信组 (ITU-R) 提供的激光雨衰减的模型,通过实验修改了模型中个别参数,得出的新的模型与实验值可以很好地吻合<sup>[1]</sup>。Gargi Rakshit 等人提出了一种使用拟随机方式确定的雨衰减参数模型,该模型的特点是衰减参数在实验中同步测得,并不需要数据处理,得到的衰减参数与降雨量匹配得很好<sup>[2]</sup>。南京理工大学的郭靖等人建立了雨滴后向散射模型并计算了不同降雨条件下的激光后向散射系数。研究表明,传输距离一定时,系统信噪比将随着降雨率的增大而减小,同时降雨大小和作用距离是影响系统信噪比的重要因素<sup>[3]</sup>。汪婷玉等人考虑了雨滴在接收透镜上形成的投影圆之间的重叠效应,建立了大气激光通信中雨滴遮挡作用的数理模型,并对激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<sup>[4]</sup>。

从已有文献和公开报道可以看出,目前对于蓝绿激光在雨中传输的衰减特性的研究成果主要可归纳为两种模型:散射模型和遮挡模型。不过这两种模型都还存在着一些不足之处,比如它们的计算精度对传输距离较为敏感;遮挡模型在处理位于激光器视场近端的大尺寸雨滴时,忽略了视角影响,可能存在着理论上的缺陷;散射模型对于视场远端的雨滴

多次散射问题的计算量过于庞大。如果采用简便方法避免了繁杂的计算过程,又会产生计算精度严重下降的问题。文中主要结合仿真结果和自然雨场实验分析两种衰减模型在不同降雨率下的精确度;同时结合散射模型的一些优点对遮挡模型进行了一定程度的算法改进,以提高激光在雨中传输衰减模型的精确性。希望文中的研究为蓝绿激光大气通信探测技术的发展能够提供一定的理论支撑。

## 1 经典雨滴衰减模型分析

### 1.1 散射模型分析

由于 532 nm 激光对水的吸收系数很小,通常情况下分析激光在雨中传输的衰减情况时可以不考虑雨滴的吸收作用的影响。对于我国大部地区最为常见的中小雨来讲,大部分雨滴分布在 0.5 mm 左右<sup>[5]</sup>,可以将雨滴粒子近似看作均匀球形。所以激光对球形雨滴的衰减模型可由下式表达<sup>[5]</sup>:

$$\alpha(\lambda) = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot Q_s(\alpha) \cdot V(L) \cdot N(D) dD \quad (1)$$

式中:  $V(L)$  为激光的光路空间体积;  $N(D)$  为雨滴尺寸分布函数,文中采用韦布分布模型描述雨滴直径  $D$  变化的规律。 $D_1$  和  $D_2$  分别表示雨滴的最小及最大直径。 $Q_s(\alpha)$  表示粒子的散射效率因子。由于雨滴尺寸对于激光波长来说是大尺度粒子,故  $Q_s(\alpha)$  可近似等于 2。然后代入公式(1)和相应激光的传输距离,即可求得一定降雨量下雨滴对激光的散射衰减  $\alpha(\lambda)$ 。

事实上,由于大气中传输介质的复杂性和时变性,导致光子的传输具有随机性。如果考虑多次散射,必须首先判断光子终止的位置,然后根据光子随机迁移的路径来进行计算。这种方法最大的缺点就是计算时间很长,并且受到单个光子运动的物理模

型精度的限制。为了能得到较准确的结果,必须跟踪大量光子轨迹,计算量非常庞大。所以分析激光在雨中传输散射时,必须进行大量简化假设。公式(1)是忽略了二次散射和多次散射后,在一个定区间内积分得到单个粒子的散射系数,再乘以整个光路空间体积中所有的粒子数,最终得到整个传输过程结束后激光的衰减。但是当激光传输距离越来越远时,光路空间中粒子数也同样越来越多。上述计算中因忽略多次散射而带来的误差就会增大到不容忽视的地步,甚至严重影响模型的精度。

### 1.2 遮挡模型分析

遮挡模型认为当激光传输距离较远时,单个雨滴粒子的散射光会很快沿周向消散,不必详细计算散射值,因此在光路中的雨滴可以视为不透明粒子。同时任意直径雨滴在激光光路空间中出现的位置服从均匀分布,故在建模的时候只根据雨滴谱和激光传输距离求得整个光路中不同直径雨滴粒子可能出现的个数,然后在考虑雨滴的重叠效应下,运用统计分析法求出传输过程结束后激光能到达接收装置的光通量的数学期望,最后再根据实际降雨量来得出衰减值。该模型的经典表述如下:

$$\alpha(\lambda) = \left| 10 \times \lg \frac{E(\phi)}{\phi} \right| \quad (2)$$

式中: $E(\phi)$ 和 $\phi$ 分别表示到达接收透镜的光通量的数学期望和激光的初始光通量。

对于遮挡理论来说,忽略单个雨滴的散射作用,直接将雨滴对激光的散射视为遮挡,其最终目的是求得接收透镜上获得光通量的期望值。虽然这样做简化了计算过程,但是通过分析遮挡模型的推导过程,会发现该理论存在一些缺陷。

图 1 为遮挡模型示意图,图中  $O$  为激光器光源,  $l$  为激光沿  $z$  方向的传输距离,  $AB$  为光功率计接收

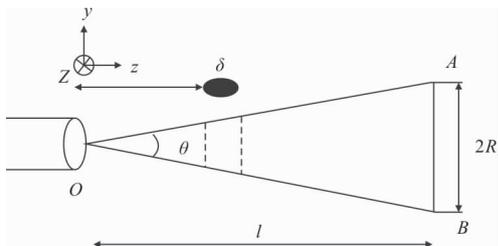


图 1 遮挡模型示意图

Fig.1 Sketch map of the shading effect model

面直径,  $\theta$  为  $O$  对  $AB$  面的张角。将雨滴按照雨滴尺寸分布,分为 1~36 个子区间。第  $i$  个子区间内对应的圆锥体  $OAB$  内雨滴数目为:

$$n_i = \int_{0.1\eta-0.1}^{0.1\eta} V_c N(D) dD \quad (3)$$

式中: $V_c$ 为整个光路的空间体积。令  $D_i$  为每个子区间内雨滴直径的均值,以第一个子区间为例,令直径在 0~0.1 mm 的所有雨滴的直径均为 0.05 mm,以此类推。位于  $z$  点处的一个直径为  $D_i$  的雨滴在圆锥体  $OAB$  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:

$$P\{z < Z \leq z + \delta_z\} = \frac{V_{\delta_z}}{V_c} = 3z^2 \delta_z / l^3 \quad (4)$$

式中: $V_{\delta_z}$ 为光路空间中一个体积微元的体积。相同体积微元内的雨滴  $Z$  轴坐标近似相近,则该直径雨滴的概率密度函数可求得如下:

$$f(z) = \frac{P\{z < Z \leq z + \delta_z\}}{\delta_z} = \frac{3z^2}{l^3}, 0 \leq z \leq l \quad (5)$$

设  $R_i$  为雨滴的投影圆半径,进而可求得该雨滴在接收透镜上的投影圆面积为:

$$S_i = \pi R_i^2 = \pi \left( \frac{l D_i}{2z} \right)^2, 0 \leq z \leq l \quad (6)$$

因此  $S_i$  具有的概率密度函数为:

$$g(S_i) = f\{z(S_i)\} \{z(S_i)\}' = \frac{3\pi^{\frac{3}{2}} D_i^3 S_i^{-\frac{5}{2}}}{16}, \frac{\pi D_i^2}{4} \leq S_i \leq \infty \quad (7)$$

进而  $S_i$  具有的数学期望为:

$$E(S_i) = \int_{\frac{\pi D_i^2}{4}}^{\infty} f\{z(S_i)\} \{z(S_i)\}' S_i dS_i = 3\pi D_i^2 / 4 \quad (8)$$

由此可得出不同直径雨滴在接收透镜上的投影圆示意图如图 2 所示。

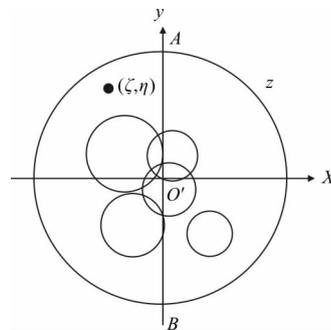


图 2 雨滴投影示意图

Fig.2 Sketch map of raindrop projection

$O'$  表示圆形接收投影的中心。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  $OAB$  内任意位置,从概率角度看,它最终在圆形接收透镜上形成的投影圆的面积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,最终求得圆形接收透镜上一点  $(\xi, \eta)$  不被所有区间内任何雨滴覆盖的概率为:

$$P' = \prod_{i=1}^{36} \left[ 1 - \frac{E(S_i)}{S_{AB}} \right] n_i \quad (9)$$

公式成立的前提是,光路空间内没有任何一个雨滴的投影圆能够将接收透镜完全覆盖。如果雨滴恰好出现在激光发射器的发射端口,那么该雨滴在接收透镜的投影圆可能完全覆盖接收透镜,即可视为完全遮挡激光的传播。这种情况可能造成光路的暂时中断,而已有的实验结果并不支持这个结论。所以原遮挡理论为了能够在整条光路上使用统计学方法求解衰减,必须忽略激光发射器视场近端出现体积足以遮挡整个视角的大雨滴的可能性。

对比公式(1)、(2),不难发现两种模型在衰减的求解方式上有着质的差异,但是也有一些可以互相补充的地方,需要进行综合、修正。

## 2 基于接收端雨滴投影圆面积判据的雨滴衰减模型改进算法

雨滴衰减模型的改进首先要解决的是遮挡模型中光路前端出现遮挡整个或者大部分视角的大雨滴引起的计算误差,如图 3 所示的情况。当光路中出现一个或若干个大雨滴时,它有可能不完全出现在圆锥体  $OAB$  的范围内。设距离激光发射器  $Z$  位置有一个直径为  $D$  的雨滴,其在接收面上的投影面积为  $S = \frac{\pi}{4} \left( \frac{ID}{z} \right)^2$ ,接收透镜  $AB$  的面积为  $S_{AB} = \pi R_l^2$ 。当  $S = S_{AB}$  时,可视为雨滴完全遮挡激光。此时求解得出  $z = \frac{ID}{2R_l}$ 。由此可看出当传输距离  $l$  为固定值时,  $z$  是粒子直径  $D$  的函数。令该雨滴直径取最大值  $D_{max}$ ,那么如果该雨滴出现在距离发射点足够近时,会对激光光路造成阻断。此时求得该雨滴距离激光发生器最短距离为  $z_{min} = \frac{LD_{max}}{2R_l}$ 。即接收透镜距离激光发射器原点  $O$  的最小距离为  $z_{min}$ 。

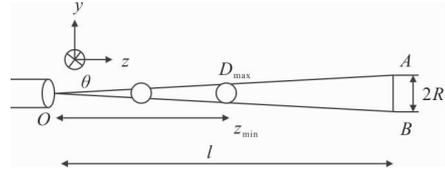


图 3 遮挡模型光路前端计算误差示意图

Fig.3 Schematic of calculation error of the shading effect model in front of the light path

一般无线光通信系统的激发发散角都  $\leq 1.5$  mrad,接收透镜直径也是在几十毫米的量级,激光光路和接收透镜形成的圆锥体  $OAB$  的锥头部分都很窄小,所以在  $0 \sim z_{min}$  这段距离内使用遮挡理论进行计算并不妥当。综合考虑散射理论和遮挡理论的优劣:在  $0 \sim z_{min}$  区间内,使用 Mie 散射理论来求解衰减,在  $z_{min} \sim l$  区间内,使用遮挡理论的统计法来进行衰减计算。这样一来,不仅可以消除散射理论长距离计算精度不够的问题,也可以解决遮挡理论近距离考虑不周到的问题。改进的衰减理论推导过程如下:

令从激光发射原点到  $z_{min}$  之间所形成的光路空间体积为  $V_1$ ,则有:

$$V_1 = \frac{\pi R_l L D_{max}}{6} \quad (10)$$

令从  $z_{min}$  到激光传输终点  $l$  之间所形成的光路空间为  $V_2$ ,则有:

$$V_2 = V_c - V_1 = \frac{\pi R_l l (2R_l D_{max})}{6} \quad (11)$$

在  $V_1$  内的衰减  $\alpha(\lambda)_1$  可由下式表达:

$$\alpha(\lambda)_1 = 4.343 \cdot \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot V_1 \cdot N(D) dD \quad (12)$$

在  $V_2$  内的衰减  $\alpha(\lambda)_2$  可做如下推导。

将公式(6)中  $z$  的区间变为:  $z_{min} \leq z \leq l$ ,重新求得  $S_i$  的概率密度函数为:

$$g(S_i) = f\{z(S_i)\} \{z(S_i)\}' = 3\pi^{\frac{3}{2}} D_i^3 S_i^{-\frac{5}{2}} / 16,$$

$$\frac{\pi D_i^2}{4} \leq S_i \leq \left( \frac{D_i R_l}{D_{max}} \right)^2 \pi \quad (13)$$

$S_i$  具有的数学期望为:

$$E(S_i) = \int_{\frac{\pi D_i^2}{4}}^{\left( \frac{D_i R_l}{D_{max}} \right)^2 \pi} f\{z(S_i)\} \{z(S_i)\}' S_i dS_i = \frac{6R_l - 3D_{max}}{8R_l} \pi D_i^2 \quad (14)$$

所以有:

$$\alpha(\lambda)_2 = \left[ 10 \times \lg \left( \prod_{i=1}^{36} \left[ 1 - \frac{6R_i - 3D_{\max}}{8R_i^3} \cdot D_i^2 \right] n_i \right) \right] \quad (15)$$

其中:

$$n_i = \int_{0.1^{*i-0.1}}^{0.1^{*i}} V_2 N(D) dD \quad (16)$$

则激光在整个光路内的衰减可表示为:

$$\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda)_1 + \alpha(\lambda)_2 \quad (17)$$

根据上述公式,用 MATLAB 建立雨滴谱分布模型并对散射模型、遮挡模型和改进的模型建模仿真。仿真结果表明:修正后的模型,在不同传输距离下的衰减值介于遮挡模型和散射模型之间;且随着传输距离的增加,修正后的模型衰减增长率远大于散射模型,略小于原遮挡模型。

### 3 自然雨场实验

为了验证理论的正确性,文中对激光在中小雨中的传输特性进行了实验研究。

图 4 所示即为自然雨场实验原理图。将激光发射器放置在原点  $O$ ,调整光功率计与激光发射器在同一水平位置。使激光通过自然降雨后到达接收器。公式(18)表示激光在雨中传输后产生的衰减。

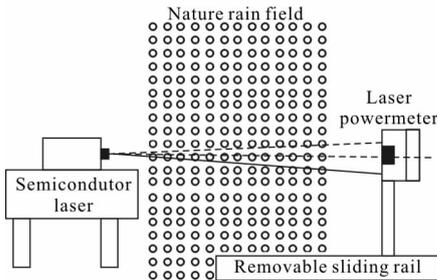


图 4 自然雨场实验原理图

Fig.4 Sketch map of nature rain field experiment

$$\alpha(\lambda) = \left| 10 \times \lg \left( \frac{P_R}{P_T} \right) \right| \quad (18)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为激光的衰减率,单位是 dB; $P_R$ 和  $P_T$ 分别表示激光经过衰减后在接收端测到的功率和激光的发射功率,单位是 mW。

实验中需要对激光光斑能量密度的分布情况进行测试,以确定激光束的中心点<sup>[7]</sup>。文中采用光电扫描法进行测量:每次实验都将激光器水平放置在同一位置,激光功率计和三维机械装置放置在规定测量距离处。该装置确保光功率计可在  $x$  轴和  $y$  轴移

动,使激光能垂直入射光功率计。并且装置底部装有滑轨,在  $z$  轴方向亦可沿着滑轨向发射器方向水平移动。每次实验时使用该三维机械装置驱动光功率计对激光的光斑横截面扫描测量,读取光功率计的数据,并记录  $x,y$  轴的坐标,从而确定激光的中心点坐标。当这个位置的实验数据采集完成后,将三维装置沿滑轨水平向激光器靠拢,进行下一个点的数据采集。

实验中发射端采用长春新产业光电技术有限公司生产的 MPL-H-532-10- $\mu$ j 半导体泵浦脉冲激光器,波长为 532 nm,脉宽约 5 ns,发散角为 1.5 mrad,出光口光斑约 1 mm。接收端采用美国 Coherent 公司生产的高灵敏度热敏探头 PM10。实验过程中使用精度为 0.2 mm/h 的双翻斗雨量计进行实时同步雨量采集。实验装置如图 5 所示(接收装置在激光发射器同轴较远位置)。



图 5 实验装置照片

Fig.5 A photo of the experimental devices

实验过程中,设置激光传输距离为 100 m。首先,为了排除空气中粉尘颗粒引起的激光衰减对实验的干扰,于 2017 年 2 月~3 月夜间,微风,能见度高的环境下进行了多次无降雨条件下激光衰减测试,测得空气中粉尘颗粒对激光的衰减  $\alpha(\lambda)$ ,作为实验背景干扰的参考值。然后,在同年 3 月~5 月,在小到中雨条件下的夜晚进行激光降雨衰减测试。图 6 为外场实验激光接收装置视图。



图 6 实验激光接收装置照片

Fig.6 Photo of the experimental laser receiving devices

实验中将光功率计接收波长调为 532 nm, 设定采样间隔为 500 次/min。从光功率计显示器上读取 1 min 采样的均值, 然后在每个测试点重复测试 5 次, 求得 5 次采样的平均值即为该点的一次实验值。表 1 列出的数据为降雨量在 1.2 mm/h 的环境下某次实验中激光在不同传输距离的实测值与无雨情况下同一距离的实测值对比。

表 1 降雨量为 1.2 mm/h 环境下的实测值  
与无雨情况下实测值对比

Tab.1 Experimental data comparison between  
1.2 mm/h rainfall and no rain condition

Transmission distance/m	Experimental data at rain/mW	Experimental data at dry/mW
10	84.402	84.413
20	67.664	67.688
30	30.028	30.043
40	16.864	16.876
50	10.789	10.798
60	7.499	7.507
70	5.474	5.482
80	4.209	4.216
90	3.281	3.288
100	2.690	2.697

在测试无雨环境下的衰减时, 分别在多次夜晚重复进行数据采集和处理, 最终求得每个点的衰减均值, 作为背景干扰。图 7 和图 8 中所给出的激光实际传输衰减曲线, 是对 3 次 0.4 mm/h 和 1.2 mm/h 降雨量条件下激光的衰减在各测试点求均值, 并扣除背景干扰后得出的衰减曲线。

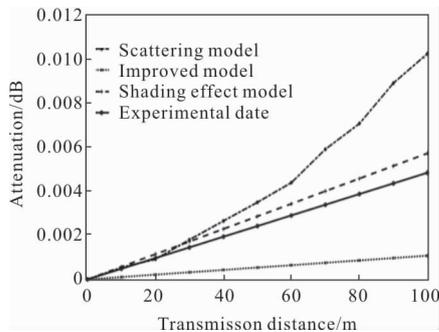


图 7 降雨量 0.4 mm/h 时激光衰减变化图

Fig.7 Trend of laser attenuation within 0.4 mm/h rainfall condition

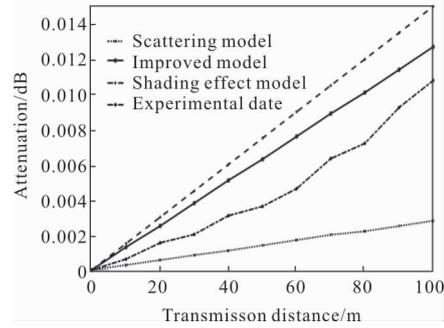


图 8 降雨量 1.2 mm/h 时激光衰减变化图

Fig.8 Trend of laser attenuation within 1.2 mm/h rainfall condition

#### 4 实验结果分析

根据雨滴衰减实验得到的测试结果, 进行如下分析: 首先, 现有的激光通信装置发射的激光都是高斯光束, 高斯光束的传输特性, 是在远处沿传播方向成特定角度扩散<sup>[8-9]</sup>。因此, 实验中采集的光功率只是整个光斑截面能量的一部分, 实验数据必须按照高斯光束的衰减进行换算后, 才能够进行下一步的计算。实际的激光发射及接收示意图如图 9 所示。

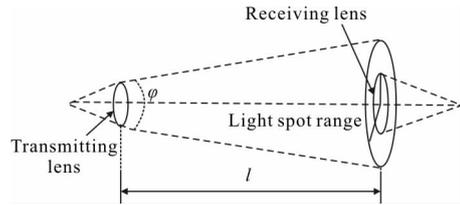


图 9 实验中激光传播示意图

Fig.9 Sketch map of laser transmission in this experiment

在激光传输一定距离后, 接收端的光斑远大于接收装置口径, 所以往往将接收的光功率认为是服从光强为  $I(0, z)$  的均匀分布。而由接收装置产生的几何衰减表示为  $L_{geo}$ , 若不考虑大气衰减其表达式为:

$$L_{geo} = \frac{P_R}{P_T} = \frac{(2R_t)^2}{2w^2(z)} = \frac{\pi^2 \varphi^2 (2R_t)^2}{8\lambda^2 + \frac{(z\pi\varphi)^2}{2}} \quad (19)$$

式中:  $w(z)$  为在传输  $z$  距离后, 激光的光斑半径。  $\varphi$  表示激光发射器的发散角, 该次实验中  $\varphi=1.5$  mrad。所以在实验中, 雨滴对激光产生的衰减  $\alpha(\lambda)'$  应为:

$$\alpha(\lambda)' = \left| 10 \times \lg \left( \frac{P_R}{P_T L_{geo}} \right) \right| - \alpha(\lambda)'' \quad (20)$$

由图 7 和图 8 可以看出, 随着传输距离的增加,

激光的衰减也在不断增大;比较两图的模型仿真结果可以发现:随着降雨量的增大,激光的衰减也会逐渐增大;图 7 中激光传输 20 m 内,实验结果与仿真结果相差不大,但是从 20 m 后,激光的实际衰减速度明显快于仿真结果。通过对多次实验情况分析发现,降雨量在 0.6 mm/h 以内的情况下,大气中会腾起许多水雾,这些随机悬浮在空气中的小粒子会使大气成分变得复杂,从而增大激光的散射,使到达接收面的光子减少,对激光的光斑扩展、光束能量产生非常严重的影响<sup>[10]</sup>。

从图 8 中可以看出,随着传输距离的增大,改进的理论模型与原遮挡模型相差越来越大。这是由于传输距离的增大使得  $z_{\min}$  同时增大,若仍然忽略 0~ $z_{\min}$  之内雨滴的遮挡作用,则误差就会越来越大;但是改进的衰减模型仍然存在一些误差,这是因为该次研究仅对接收透镜视角内出现单个雨滴全遮挡的情况进行了修正,并没有考虑到接收透镜视角被遮挡大部分区域的情况。同时可以看到将大气中微粒作为背景干扰摒弃之后,在实验范围 100 m 内,激光的实际衰减呈比较稳定的增长,将之与仿真结果对比可以发现:改进的理论模型相比较原遮挡模型更接近于实验结果,在传输距离为 100 m 时,改进的理论模型相比较原遮挡模型精度提高了 54.6%。

比较图 7、图 8 两图的散射模型仿真结果和实验结果不难发现,在传输距离 20 m 以内,实际衰减与散射仿真衰减相差不大,但是随着传输距离增大,实际衰减增加速度明显快于散射模型仿真结果。这是因为随着传输距离的增大,光路中出现的雨滴粒子也成倍增大,以单个粒子散射截面为基础进行积分的散射衰减模型,其误差会逐渐增大到不容忽视的地步,这也导致其精度远远比不上改进的衰减理论。这一情况也与 1.1 节提到的预期相符。

通过实验结果与仿真结果的对比可以看出,在传输距离为分别为 20、70、100 m 时,改进的理论模型的精度相比较原遮挡模型精度分别提高 34.2%、38.4、54.6%左右,相比较原散射模型精度分别提高了 0.02%、40.9%、76.1%左右,证明了该理论具有更高的可靠性。

## 5 结 论

通过上述的理论分析和实验验证可以得到以下结论:

(1) 单一的散射模型或者遮挡模型,都不能够很好地描述激光在雨中的实际衰减情况;散射模型在计算单个粒子散射的时候为了求解方便,忽略了激光的二次散射和折射。这种误差会随着激光传输距离的增加而增大,导致其只能在传输距离 20 m 左右范围内使用才会保证较高的精度;而遮挡模型因为传输距离越远,模型忽略的光路空间就越多,而事实上被忽略的这部分光路中很有可能存在大尺寸雨滴粒子。所以遮挡模型与实际情况相比也有较大误差。

(2) 改进算法将散射理论和遮挡理论进行了很好的融合,既弥补了散射理论精度下降太快的不足,又完善了遮挡理论长距离传输的理论缺陷。在该次实验的 100 m 范围内,改进的理论模型的精度相比较原遮挡模型和散射模型的精度均有显著的提高,因此用改进的雨滴衰减模型能够更加真实地描述激光的衰减特性。

文中通过对散射模型和遮挡模型的理论分析,深度解析原有衰减模型的不足,提出了基于接收端雨滴投影圆面积判据的雨滴衰减模型改进算法,对接收透镜视角内出现单个雨滴全遮挡的情况进行了改进。相信这一改进的衰减模型能够对实际应用中发射系统功率和接收系统精度的选择提供一定的理论参考。

该次研究仅对接收透镜视角内出现单个雨滴全遮挡的情况进行了修正,并没有分析接收透镜视角出现大部分区域遮挡的情况,接下来课题组将会针对这一情况展开详细研究,希望能够得到更为准确全面的激光衰减模型。此外,由于时间关系文中实验大部分在小雨情况下进行,雨滴尺寸可以近似为球型。但是在大到暴雨的情况下,雨滴的形状不能简单的近似为球型,其形状更像是椭球形。这个时候就不能用 Mie 散射来近似计算雨滴的散射衰减了,需要用到更为精确的粒子追踪法来求解<sup>[11]</sup>。所以该理论目前只适用于小雨条件(降雨量  $\leq 5$  mm/h)。下一步将在大雨到暴雨的情况下来研究激光的传输距离与衰减的关系。

## 参考文献:

- [1] Samir A Al-Gailani, Abu Bakar Mohammad, Usman U Sheikhd, et al. Determination of rain attenuation parameters for free space optical link in tropical rain [J]. *Optik*, 2014, 125: 1575–1578.
- [2] Gargi Rakshit, Arpita Adhikari, Animesh Maitra. Modelling of rain decay parameter for attenuation estimation at a tropical location [J]. *Science Direct*, 2017, 59: 2901–2908.
- [3] Guo Jing, Zhang He, Zhao Xuejian. Study on backscattering characteristics of laser ranging system in the rain [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1114002.  
郭靖, 张合, 赵学建. 降雨对激光定距系统的后向散射特性研究 [J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 1114002.
- [4] Wang Tingyu, Cheng Jiabi. Shading effect of rain drops in ship free space laser communication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2652–2657. (in Chinese)  
汪亭玉, 陈家璧. 雨滴在船舶大气激光通信中的遮挡作用 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2652–2657.
- [5] Liu Xichuan, Gao Taichang, Hu Yuntao, et al. Precipitation micro-physical characteristics sensor based on double-pulse in single frame imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 842–849. (in Chinese)  
刘西川, 高太长, 胡云涛, 等. 基于单帧双脉冲成像的降水微物理特征测量仪 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 842–849.
- [6] Wang Zhe, Wang Jingyuan, Xu Zhiyong, et al. Link loss of long wavelength infrared laser propagating through rain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3092–3097. (in Chinese)  
王喆, 汪井源, 徐智勇, 等. 远红外激光雨中传输损耗的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3092–3097.
- [7] Tang Yanqin, Gu Guohua, Qian Weixian, et al. Laser spot center location algorithm of four-quadrant detector based on Gaussian distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206003. (in Chinese)  
唐彦琴, 顾国华, 钱惟贤, 等. 四象限探测器基于高斯分布的激光光斑中心定位算法 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0206003.
- [8] Li Yanjie, Jin Guang, Zhang Yuan, et al. Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 220–226. (in Chinese)  
李艳杰, 金光, 张元, 等. 成像与激光发射系统的共口径设计与实验 [J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 220–226.
- [9] Liu Hua. Gaussian beam shaping diffractive optical element designed by Hankel transformation [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 277–283. (in Chinese)  
刘华. 利用汉克尔变换设计高斯光束整形衍射元件的应用研究 [J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 277–283.
- [10] Li Yanna, Tang Litie, Xie Xiangyun, et al. Measuring far-field instantaneous facula intensity space-time distribution of solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817002. (in Chinese)  
李艳娜, 唐力铁, 谢翔云, 等. 固体激光远场瞬时光斑时空分布测量技术 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0817002.
- [11] Liu Xichuan, Gao Taichang, Liu Lei. Effect of rainfall on laser transmission attenuation based on non-spherical raindrops [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 168–172. (in Chinese)  
刘西川, 高太长, 刘磊. 基于非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 168–172.