

## 基于粒子谱分布的无线紫外光通信散射传输特性研究

宋 鹏<sup>1</sup>, 蔡媛敏<sup>1\*</sup>, 耿晓军<sup>2</sup>, 郭 华<sup>1</sup>, 冀汉武<sup>1</sup>, 张国青<sup>3</sup>

1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048
2. Electrical & Computer Engineering Department, California State University, Northridge, CA 91330, USA
3. 西安工程大学理学院, 陕西 西安 710048

**摘 要** 在非直视无线紫外光通信中, 利用大气中的粒子对紫外光进行散射作用来传递信息, 非直视紫外光通信在近距离隐蔽通信中有广阔的应用前景。雾霾粒子属于气溶胶范畴, 由空气中的灰尘、硫化物、有机碳氢化合物等粒子组成。雾霾粒子的尺度、浓度、形状等因素均会对无线紫外光散射通信的传输特性产生较大的影响。首先, 基于蒙特卡罗方法建立了非直视紫外光多次散射模型, 将霾粒子的半径和浓度这两个物理量引入该模型中, 通过模拟大量光子在雾霾条件下经多次散射到达接收端的概率, 进而仿真分析了系统路径损耗与粒子半径和浓度之间的关系。结果表明, (1) 在无线紫外光近距离通信条件下, 雾霾浓度越大, 路径损耗越小, 系统通信性能越好; (2) 通信距离大于 500 m 时, 增加雾霾粒子浓度, 系统路径损耗总体先减小再增大; (3) 在粒子浓度一定情况下, 增大粒子半径, 路径损耗先减小后增大, 且随着通信距离的增大, 路径损耗极小值的位置不断向粒子半径小的一侧移动。其次, 在模型中引入粒子尺度谱分布的概念, 对粒子尺度谱分布进行分割, 分别求出不同粒径及其所对应浓度。假定粒子尺度谱分布中不同粒径的粒子依次对光子产生散射作用, 对相应光子到达接收端的概率求和, 得到光子到达接收端的总概率, 进而求得多种粒径的粒子共同存在情况下系统的路径损耗, 使仿真模型更加逼近实际大气信道中多种半径雾霾粒子共同存在的事实。最后, 搭建实验平台, 分别在良好、严重雾霾、极严重雾霾三种不同天气条件下, 实验测量了系统路径损耗和通信距离、收发仰角之间的关系, 并与考虑粒子尺度谱分布模型中计算得到的路径损耗进行对比, 实验数据与仿真结果趋势一致, 雾霾天气下的通信质量优于良好天气, 收发仰角越大对应的路径损耗也越大。

**关键词** 紫外光; 雾霾粒子; 粒子谱分布; 路径损耗

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0970-08

## 引 言

紫外光通信 (ultraviolet communication, UVC) 利用“日盲”波段 (波长为 200~280 nm) 的紫外光传输信息, 具有背景噪声小, 非直视 (non-line-of-sight, NLOS) 传输的独特优势<sup>[1]</sup>, 以及低窃听率、全方位性和全天候工作的特点, 在军事领域有广阔的应用前景。UVC 利用大气中的尘埃、气溶胶粒子等对紫外光的散射作用传递消息, 天气条件是影响其散射特性的重要因素<sup>[2]</sup>。近年来雾霾天气频发, 研究雾霾天气条件下无线 UVC 信道传输特性十分必要。

路径损耗作为评估通信质量好坏的关键参数, 有关学者

对此做了多方面研究。2012 年 Tang 等<sup>[3]</sup>对 NLOS 单次散射信道模型进行简化, 给出了路径损耗的闭合解, 分析路径损耗与能见度之间的关系。2015 年 Xu 等<sup>[4]</sup>基于蒙特卡罗多次散射模型, 研究了从紫外光到可见光和红外波段, 不同波长下路径损耗与通信距离的关系。2016 年林等<sup>[5]</sup>指出雾天气条件下, 路径损耗与能见度并非单调关系, 随着能见度的变化, 路径损耗存在极小值。2017 年 Song 等<sup>[6]</sup>提出一种更高效的黎曼和方法, 仿真分析非共面 UVC 系统的路径损耗。2019 年 Wu 等<sup>[7]</sup>基于球面坐标系的单散射共面模型, 提出一种估计短距离 UVC 的路径损耗新方法。

目前, 运用光散射理论对粒子的散射传输特性已做了较多研究。2015 年 Xu 等<sup>[8]</sup>利用拟合函数代替复杂 Mie 理论计

收稿日期: 2021-02-26, 修订日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61971345, 11975176), 西安市科技局高校人才服务企业项目 (GX YD7.15) 资助

作者简介: 宋 鹏, 1976 年生, 西安工程大学电子信息学院副教授 e-mail: pengsong916@126.com

\* 通讯作者 e-mail: y. m. cai@foxmail.com

算，分别研究雾和霾两种气溶胶粒子的尺寸和浓度对路径损耗的影响，但是没有进行实验验证对比。2016 年 Miffre 等<sup>[9]</sup>在两种不同波长下进行了颗粒大小和形状分布可控的去极化实验，结果表明去极化率与粒径的分布有关，但是没有对紫外波段进行研究。2017 年 Zhang 等<sup>[10]</sup>基于有限元分析，提出一种基于偏振特性在单粒子基础上区分球形和链状粒子的方法，主要针对单一粒径的粒子进行研究。2018 年有报道分别用 Mie 散射和 T 矩阵理论研究了不同形态和浓度下的雾霾粒子紫外光散射信道特性，但是没有研究粒子半径与尺度谱分布的关系。2020 年赵等<sup>[11]</sup>针对具有不同粒子数量的煤烟气溶胶，生成了包覆水层的凝聚粒子模型，利用离散偶极子近似(DDA)方法仿真分析包覆水层的煤烟气溶胶的散射特性，并分析了凝聚粒子以及相对湿度对紫外光脉冲响应和路径损耗的影响。

以上对于粒子光散射的研究，主要是针对单一粒径粒子进行探索，而现实大气信道中是多种粒径尺度的粒子共同存在。为了更加逼近多种粒径粒子共同对光进行散射作用的客观事实，本研究基于蒙特卡罗方法，提出一种更符合实际大气信道的无线紫外光通信系统路径损耗计算方法，抽样计算不同粒径粒子在谱分布中的浓度，仿真分析了不同粒径粒子对紫外光的整体散射和吸收作用，并完成了三种不同浓度天气下的实验与仿真结果对比。

## 1 理论基础

### 1.1 Mie 散射理论

雾霾粒子能对入射光产生吸收、折射、反射和散射等作用，受雾霾不同成分、浓度分布、粒子大小的影响，会对紫外光在传输过程中产生不同的散射和吸收作用。由于雾霾粒子半径较小(0~1 μm)，可将其视为球形粒子，其直径远大于紫外光的波长，因而选用 Mie 理论研究其散射问题。

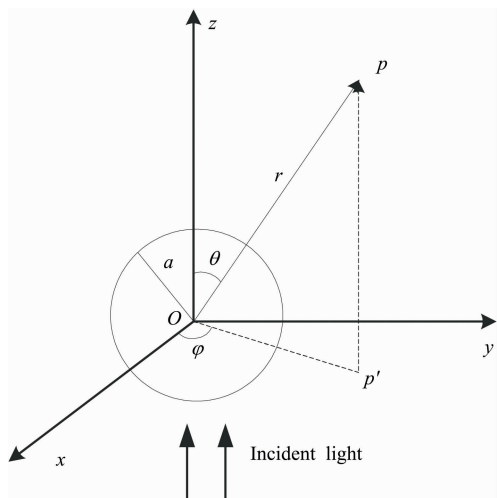


图 1 球形粒子 Mie 散射示意图

Fig. 1 Mie scattering diagram of spherical particles

球形粒子 Mie 散射示意图如图 1 所示，散射体位于坐标原点 O，a 是球形颗粒的半径，假设点 P 为观测点，r 为观测

点 P 与散射点 O 之间的距离，散射光方向(OP 方向)与入射光方向(z 轴方向)组成的平面即为散射面，θ 为散射角，OP' 线为 OP 在 xy 平面的投影线，φ 为入射光振动面与散射面之间夹角。根据 Mie 理论，引入无因次粒径参量  $a = 2\pi a/\lambda$ ，其中 λ 是入射光在颗粒周围介质中的波长，颗粒相对于周围介质的折射率为 m。

$a_n$  和  $b_n$  称为 Mie 系数，是 m 和 a 的函数，分别表示为

$$\begin{cases} a_n = \frac{\Psi_n(\alpha)\Psi'_n(m\alpha) - m\Psi'_n(\alpha)\Psi_n(m\alpha)}{\zeta_n(\alpha)\Psi'_n(m\alpha) - m\zeta'_n(\alpha)\Psi_n(m\alpha)} \\ b_n = \frac{m\Psi_n(\alpha)\Psi'_n(m\alpha) - \Psi'_n(\alpha)\Psi_n(m\alpha)}{m\zeta_n(\alpha)\Psi'_n(m\alpha) - \zeta'_n(\alpha)\Psi_n(m\alpha)} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， $\Psi_n(z)$  和  $\zeta_n(z)$  为半整数阶 Bessel 函数和第二类 Hankel 函数，由式(2)表示

$$\begin{aligned} \Psi_n(z) &= \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z) \\ \zeta_n(z) &= \left(\frac{\pi z}{2}\right)^{\frac{1}{2}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z) \end{aligned} \quad (2)$$

消光效率因子  $Q_{\text{ext}}$ 、散射效率因子  $Q_{\text{sca}}$  和吸收效率因子  $Q_{\text{abs}}$  可由分别由  $a_n$  和  $b_n$  表示为式(3)，式(4)和式(5)

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (3)$$

$$Q_{\text{sca}} = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (4)$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \quad (5)$$

为了研究路径损耗随着 Mie 粒子的半径与浓度变化规律，Mie 粒子散射系数、吸收系数<sup>[8]</sup>和消光系数可以表示为

$$K_s^{\text{Mie}} = N_v(r) Q_{\text{sca}}(r) \pi r^2 \quad (6)$$

$$K_a^{\text{Mie}} = N_v(r) Q_{\text{abs}}(r) \pi r^2 \quad (7)$$

$$K_e^{\text{Mie}} = K_s^{\text{Mie}} + K_a^{\text{Mie}} \quad (8)$$

式(6)一式(8)中 r 是 Mie 粒子的半径， $N_v(r)$  是 Mie 粒子的浓度， $Q_{\text{sca}}(r)$  和  $Q_{\text{abs}}(r)$  分别为散射效率因子和吸收效率因子，可由式(3)一式(5)得到。

### 1.2 粒子尺度谱分布

颗粒的粒径指颗粒所占据空间大小的尺度，是颗粒最基本的几何特征。雾霾粒子属于气溶胶范畴，常用 Gamma 指数分布，即修正的 Γ-分布描述其粒子尺度分布。Gamma 指数分布表达式为式(9)

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp(-br^{\beta}) \quad (9)$$

式(9)表示半径为 r 的粒子在单位体积内的数目，a, b, α, β 由表 1 确定。

表 1 谱分布模式参数

Table 1 Size distribution model parameters

	a	b	$r_c/\mu\text{m}$	α	β
Haze L	$4.9757 \times 10^6$	15.118 6	0.07	2	1/2
Haze M	$5.3333 \times 10^4$	8.944 3	0.05	1	1/2
Haze H	$4.0000 \times 10^5$	20.000 0	0.10	2	1

表 1 分别给出 Haze L, Haze M, Haze H 三种形式的雾霾粒子的谱分布模式参数<sup>[12]</sup>，其中  $r_c$  是众数半径。Haze L 一般代表大陆性气溶胶，Haze M 为海洋性和沿海地区的气

溶胶设计, Haze H 适用于高空平流层气溶胶。

根据式(9)和表 1 中的数据可以得到图 2, 图 2(a), (b) 和(c)三幅图分别对应 Haze L, Haze M 和 Haze H 三种雾霾粒子的谱分布图。由图 2 可知, 三种雾霾粒子的谱分布曲线都会出现极大值, 随着粒子半径的增大, 极大值左侧的离子浓度会快速增大, 极大值右侧的离子浓度则缓慢减小。Haze L 的霾粒子半径较集中在  $0.01 \sim 0.7 \mu\text{m}$ , Haze M 的霾粒子半径较集中在  $0.005 \sim 1 \mu\text{m}$ , Haze H 的霾粒子半径较集中在  $0.025 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 。

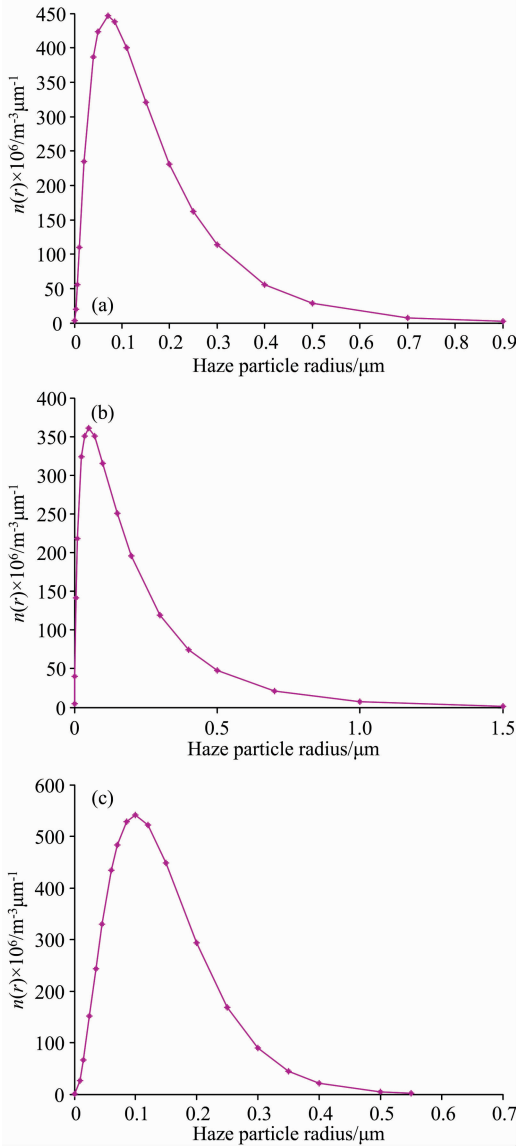


图 2 雾霾粒子谱分布曲线

(a): Haze L; (b): Haze M; (c): Haze H

Fig. 2 Size distribution curve of Haze particles

(a): Haze L; (b): Haze M; (c): Haze H

为了更加真实地反映雾霾粒子对紫外光传输特性的影响, 考虑谱分布中不同粒径的粒子对紫外光的整体散射和吸收作用, 由于式(9)所描述的谱分布是连续谱, 为了计算方便需要对图 2 的连续谱离散化。以 Haze H 为例对谱分布曲

线进行分割, 如图 3 所示, 在谱分布曲线图的横坐标上取  $M$  个粒子半径值点, 选择的原则是离散化后的谱分布曲线依然能平滑地呈现。如在图 3 中  $r_{m-1}, r_m, r_{m+1}$  即为选取的粒子半径取值点,  $r_m$  上方的阴影长方形面积表示半径为  $r_m$  的粒子的浓度  $N_v(r_m)$ 。  $r_m$  上方的阴影长方形的左边界是  $r_{m-1}$  和  $r_m$  连线的中点, 右边界是  $r_m$  和  $r_{m+1}$  连线的中点, 上边界是把  $r_m$  代入式(9)所求得值。经过对粒子谱密度曲线的离散化, 把粒子谱密度曲线所描述的由无限种粒子半径和粒子浓度所组成的雾霾粒子散射体转化为半径和浓度确定的  $M$  种粒子的集合。  $M$  种粒子的半径依次表示为  $r_1, \dots, r_M$ , 所对应的浓度依次表示为  $N_v(r_1), \dots, N_v(r_M)$ 。

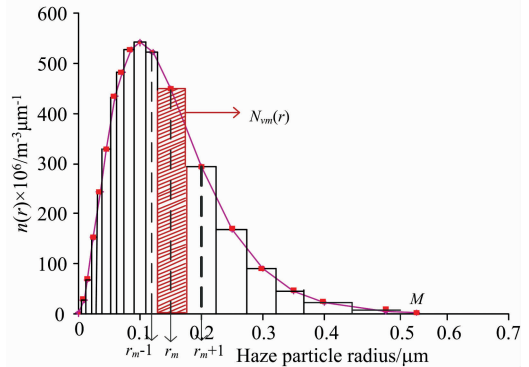


图 3 Haze H 粒子谱分布分割示意图

Fig. 3 Size distribution segmentation sketch of Haze H

### 1.3 非直视多次散射传输模型

当收发端距离较大, 或收发端仰角均较大时, 经过多次散射后到达接收端的光子不能被忽略, 为了更精确地得到系统的路径损耗值, 采用蒙特卡罗方法建立考虑粒子谱分布的多次散射传输模型。

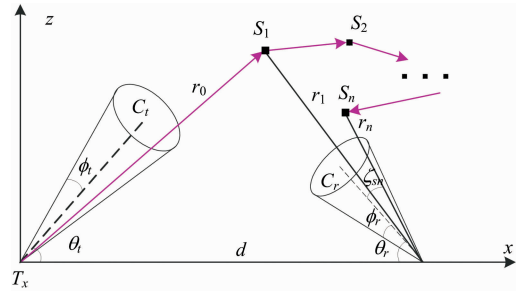


图 4 非直视紫外光多次散射传播模型

Fig. 4 NLOS UV communication multiple scattering model

#### 1.3.1 经单一粒径粒子散射, 系统路径损耗的计算

假设大气信道中只存在单一粒径的粒子, 粒子半径为  $r$ , 粒子浓度为  $N_v(r)$ , 此时散射信道的 Mie 散射系数、吸收系数和消光系数分别为  $K_s^{\text{Mie}}$ ,  $K_a^{\text{Mie}}$  和  $K_e^{\text{Mie}}$ , 其值分别可由式(6)一式(8)求得。传输信道总的散射系数、吸收系数、消光系数分别表示为式(10)一式(12)

$$K_s = K_s^{\text{Mie}} + K_s^{\text{Ray}} \quad (10)$$

$$K_a = K_a^{\text{Mie}} + K_a^{\text{Ray}} \quad (11)$$

$$K_e = K_s + K_a \quad (12)$$

式中,  $K_s^{\text{Ray}}$ ,  $K_a^{\text{Ray}}$  分别为瑞利散射系数和吸收系数。

非直视紫外光多次散射传播模型如图 4 所示, 发射端  $T_x$  与接收端  $R_x$  之间的距离为  $d$ ,  $\theta_t$  和  $\theta_r$  分别为发送端和接收端仰角,  $\phi_t$  和  $\phi_r$  分别为发送端发散角和接收端视场角。  $S_1, S_2, \dots, S_n$  是  $n$  个散射点,  $r_0$  为发射端光子到散射点  $S_1$  的距离,  $r_n$  是  $S_n$  到接收端的距离。

如图 4 所示, 如果散射点  $S_n$  在接收锥体内, 即  $\zeta_n < \phi_r$ , 则光子有可能被接收端接收。光子经过  $S_n$  点散射, 指向接收面的概率为

$$P_{1n} = \frac{A \cos \zeta_{S_n}}{4\pi r_n^2} P(\cos \theta_{S_n}) \quad (13)$$

式(13)中,  $A$  为  $R_x$  的接收孔径面积,  $P(\cos \theta_{S_n})$  为散射相函数, 相函数详细计算可以参考文献[6]。

光子经过  $S_n$  点散射后能够传输  $r_n$  距离的概率为

$$P_{2n} = e^{-K_e r_n} \quad (14)$$

式(14)中, 消光系数  $K_e$  可由式(12)计算得到。

一个光子经过第  $n$  次散射后能够到达接收端接收面的概率为

$$P_n = W_n P_{1n} P_{2n} \quad (15)$$

式(15)中,  $W_n$  是光子到达  $S_n$  点前存活概率,  $W_n$  可由式(16)计算得到

$$W_n = W_{n-1} (1 - P_{n-1}) e^{-K_a |S_n - S_{n-1}|} \quad (16)$$

式(16)中, 吸收系数  $K_a$  可由式(11)得到, 式(16)中,  $|S_n - S_{n-1}|$  为散射点  $S_{n-1}$  到点  $S_n$  的距离, 光子能传输该距离的概率为  $e^{-K_a |S_n - S_{n-1}|}$ ,  $W_0$  设为  $K_s/K_e$ ,  $K_s$  由式(10)得到。

一个光子最多经过  $N$  次散射后到达接收端的总概率为

$$P_N = \sum_{n=1}^N P_n \quad (17)$$

单一粒径条件下, 用蒙特卡罗方法计算非直视多次散射信道的路径损耗  $P_L$  可表示为

$$P_L = \frac{P_T}{P_R} = \frac{1}{P_N} \quad (18)$$

式(18)中,  $P_T$  是发射端光功率,  $P_R$  是接收端光功率。

### 1.3.2 考虑粒子谱分布系统路径损耗的计算

根据图 3, 假设粒子谱分布中半径为  $r_m$ 、浓度为  $N_v(r_m)$  的粒子依次对光子产生散射作用, 在考虑粒子谱分布条件下一个光子到达接收端总的概率为

$$P_{NM} = \sum_{m=1}^M P_N(r_m) \quad (19)$$

式(19)中,  $P_N(r_m)$  可以由式(17)求得。

考虑粒子谱分布的系统路径损耗可以表示为式(20)

$$P_{LM} = \frac{P_T}{P_R} = \frac{1}{P_{NM}} \quad (20)$$

## 2 实验部分

### 2.1 雾霾粒子半径与散射、吸收系数的关系

根据相函数和光学厚度可推算出大气气溶胶粒子的折射率, 采暖期气溶胶平均折射率为  $1.517 + 0.034i$ , 非采暖期平均折射率为  $1.533 + 0.016i$ [13]。选取折射率为非采暖期时折射率  $1.533 + 0.016i$ , 以此排除采暖期期间其他粒子的影响。

产生雾霾的主要原因是粒子半径在  $0 \sim 1 \mu\text{m}$  之间的细小污染气溶胶粒子增多, 因此选择  $0 \sim 1 \mu\text{m}$  范围的雾霾粒子粒径。

依据式(10)和式(11), 散射系数、吸收系数与雾霾粒子半径的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 散射系数在半径为  $0.15 \mu\text{m}$  时达到最大值, 之后波动减小; 吸收系数则随着粒径的增大逐渐增大。入射光线通过介质时, 由于粒子对光的散射和吸收作用使入射光减弱, 散射系数表示气溶胶把入射光散射到其他方向的能力, 散射作用越强接收端收到的有用信号功率越大, 因此在粒子半径为  $0.15 \mu\text{m}$  处时, 其对紫外光的散射作用最强, 通信质量最好。

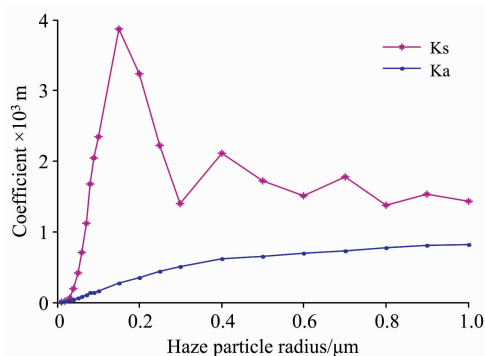


图 5 散射、吸收系数与霾粒子半径的关系

Fig. 5 Relationship between scattering and absorption coefficient and haze particle radius

### 2.2 不同浓度下的雾霾粒子散射传输特性

图 6 所示为通信距离分别是 100, 250, 500 和 1 000 m 情况下路径损耗与雾霾粒子浓度的变化关系, 参见图 5, 粒子半径设定为  $0.15 \mu\text{m}$ , 对应的散射系数为  $3.875 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ , 吸收系数为  $0.276 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ , 雾霾浓度单位为  $10^9 \text{ m}^{-3}$ 。仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

Parameter	Value
Wavelength $\lambda$	260 nm
Particle radius $R$	$0.15 \mu\text{m}$
The number of transmitted photons $M$	$20^6$
The number of multiple scattering $N$	2
Beam angle $\phi_t$	$3^\circ$
Field of view (FOV) $\phi_r$	$40^\circ$
Transmitter's elevation angle $\theta_t$	$[10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ]$
Receiver's elevation angle $\theta_r$	$[10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ]$
Emission power $P_T$	0.6 mW
Detector active area $A$	$1.92 \text{ cm}^2$
Information rate $R_{BT}$	10 kbps
Baseline distance $d$	$[10, 250, 500, 1\ 000 \text{ m}]$

由图 6 中四个子图可见, 收发仰角越大, 路径损耗越大, 这是因为随着收发仰角增大, 光子经过的非直视传输距离就会增大, 接收端接收到的光子数减少。由图 6(a)可见, 随着

粒子浓度的增大, 路径损耗逐渐减小, 这是因为由式(6)和式(7)可得, 随着粒子浓度的增大, 散射系数和吸收系数均增大, 因为通信距离较短, 散射系数增大作用更为明显, 路径损耗相应减小。由图 6(b)可见, 随着粒子浓度的增大, 收发仰角为  $10^\circ$  时, 路径损耗逐渐减小; 收发仰角为  $70^\circ$  时, 路径损耗先减小后增大。这是因为收发仰角为  $10^\circ$  时, 光子传

输的非直视链路距离较短, 散射系数增大起主要作用。收发仰角为  $70^\circ$  时, 非直视链路距离较远, 随着粒子浓度的增大, 与散射系数增大相比, 吸收系数增大的作用先弱后强, 最终引起路径损耗先减小后增大。由图 6(c)和(d)可见, 收发仰角为  $10^\circ$  时, 路径损耗先减小后增大; 收发仰角为  $70^\circ$  时, 路径损耗逐渐增大, 原因与图 6(b)的分析相同。

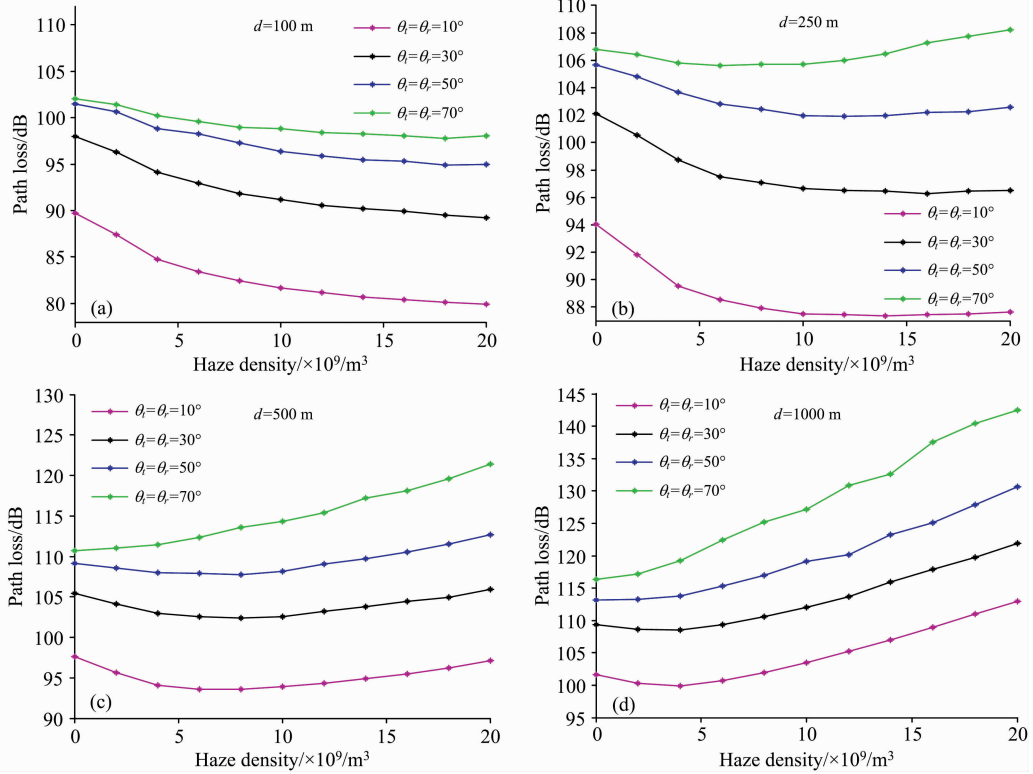


图 6 霾粒子浓度对路径损耗的影响

(a):  $d=100\text{ m}$ ; (b):  $d=250\text{ m}$ ; (c):  $d=500\text{ m}$ ; (d):  $d=1\ 000\text{ m}$

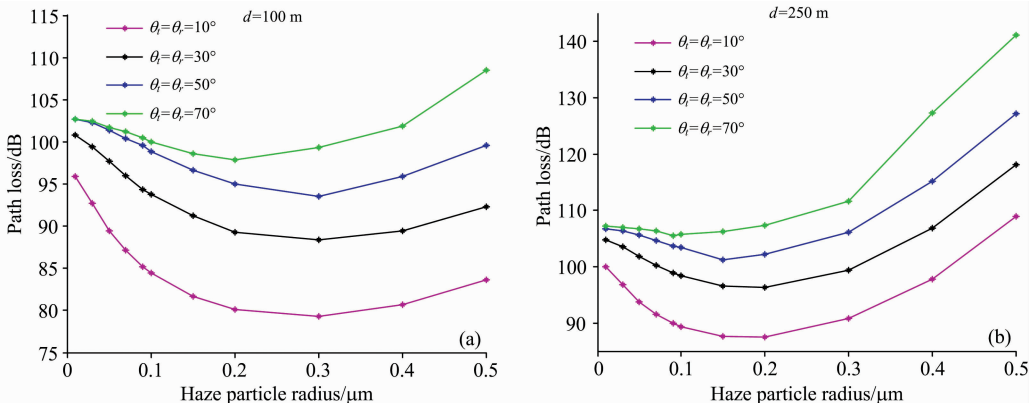
Fig. 6 Path loss changing with haze particles density

(a):  $d=100\text{ m}$ ; (b):  $d=250\text{ m}$ ; (c):  $d=500\text{ m}$ ; (d):  $d=1\ 000\text{ m}$

2.3 不同半径下的雾霾粒子散射传输特性

图 7(a—d)所示为通信距离分别是 100, 250, 500 和 1 000 m 的情况下路径损耗与雾霾粒子半径大小的变化关系。其中雾霾粒子浓度由图 6 定为  $10 \times 10^9/m^3$  固定值, 收发仰角分别为  $10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$  和  $70^\circ$ 。

由图 7 可知, 在浓度不变的情况下, 随着粒子半径的增大, 路径损耗先减小后增大。随着通信距离增大, 拐点出现的位置向粒子半径小的一侧移动; 如在收发仰角为  $10^\circ$  时, 通信距离为 100 m 在粒子半径为  $0.3\ \mu\text{m}$  处路径损耗取得最小值, 而通信距离为 1 000 m 在半径为  $0.09\ \mu\text{m}$  处取得最小





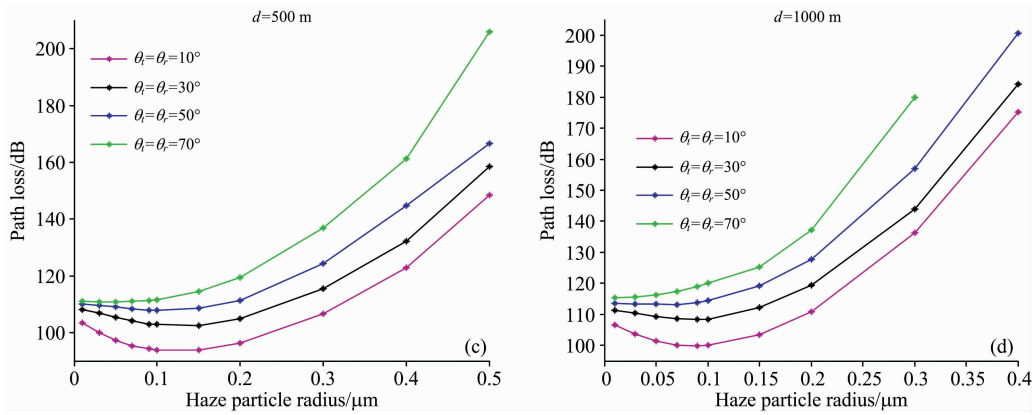


图 7 霾粒子半径对路径损耗的影响

(a):  $d=100\text{ m}$ ; (b):  $d=250\text{ m}$ ; (c):  $d=500\text{ m}$ ; (d):  $d=1\ 000\text{ m}$

Fig. 7 Path loss changing with haze particle radius

(a):  $d=100\text{ m}$ ; (b):  $d=250\text{ m}$ ; (c):  $d=500\text{ m}$ ; (d):  $d=1\ 000\text{ m}$

值。因此可以得到随着通信距离的增加，粒子半径越小通信质量越好。由图 6 和图 7 可以看出增大雾霾粒子浓度与增大粒子半径对路径损耗的影响有相似的效果。

### 3 结果与讨论

实验收发装置如图 8 所示，实验发射端选用全发散角为  $6^\circ$  的 UV-TOP255 紫外 LED，接收端选用 FOV 为  $80^\circ$  的滨松 R7154 光电倍增管接收信号，光电倍增管前有一个  $0.8\text{ cm} \times 2.4\text{ cm}$  的矩形传感窗口，检测面积为  $1.92\text{ cm}^2$ ，为了扩大通信距离，实验选择在晚上进行，光电倍增管前无滤光片。

根据气象预报选择了三种不同天气条件，分别为良好天气、严重雾霾天气和极严重雾霾天气，三种天气气象数据如表 3 所示。

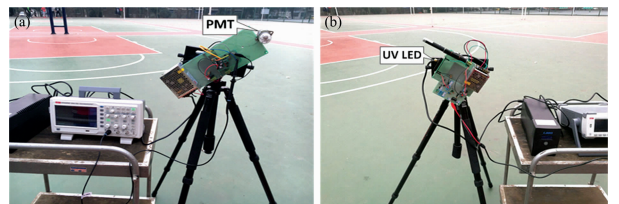


图 8 紫外光通信装置

(a): 接收机; (b): 发射机

Fig. 8 Experimental device for UV communication

(a): Receiver; (b): Transmitter

仿真计算中，式(9)用到的三种天气条件下的谱分布参数根据参考文献[14]中的数据计算得到，三种天气谱分布参数如表 4 所示。

表 3 天气气象数据

Table 3 Weather parameters

Parameter	Visibility /km	PM2.5 Concentration /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	PM10 Concentration /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Temperature / $^\circ\text{C}$	Wind speed /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Relative humidity/%
Fine weather	10	69	71	2	1~2	48
Severe fog and haze weather	3	374	412	3	2~3	81
Extremely severe fog and haze weather	2	509	610	3	2~3	86

表 4 三种天气谱分布参数

Table 4 Three weather size distribution parameters

	Fine weather	Severe fog and haze weather	Extremely severe fog and haze weather
$a$	$2.529\ 64 \times 10^7$	$6.852\ 04 \times 10^7$	$46.617\ 7 \times 10^7$
$b$	21.059	36.24	32.52
$\alpha$	1.967	3.614	3.437
$\beta$	0.654	1.197	0.956

不同天气条件下路径损耗与通信距离的关系如图 9 所示，由于实验大气信道中多种粒径粒子必定同时存在，为与实验条件更为贴近，仿真结果给出考虑粒子谱分布的路径损耗。图 9 的实验结果和仿真结果趋势一致，均显示路径损耗随着通信距离的增大而逐渐增大；在通信距离相同的情况下，雾霾天气越严重，路径损耗越小，这个结论与图 6 中通信距离为  $100\text{ m}$  的仿真结论相同。由图 9(a)和(b)对比可以看出，在通信距离和天气情况都相同的条件下，路径损耗随着收发仰角的增大而增大，实验结果与图 6 给出的路径损耗与收发仰角的关系一致。

由图 9 可以看出, 仿真得到的路径损耗数值明显大于实验数值, 最初认为这是因为实验中未加滤光片以及光电倍增管的响应波段较宽, 进而引起光电倍增管接收光功率偏大, 相应的路径损耗计算结果与仿真结果相比偏小, 后经实验验证, 在相同实验条件下, 在晚上无线紫外光通信实验中, 加滤光片和不加滤光片测得的系统路径损耗比较接近, 因此排

除没有加滤光片的原因。在多次实验中我们发现, 因为通信距离较近、收发端距离地面小于 2 m, 接收端光电倍增管可以接收发送端发出的经地面反射的紫外光, 而目前蒙特卡罗信道模型中均认为光子如果打到地面将不再传输, 因此与实验相比仿真计算的接收光功率偏小, 继而所得路径损耗偏大, 下一步计划对该问题做进一步研究。

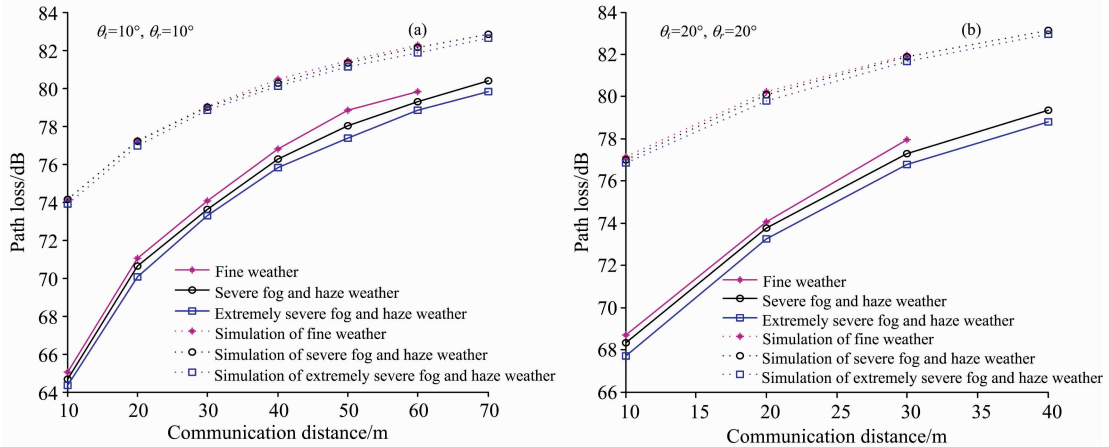


图 9 不同天气条件下路径损耗与通信距离的关系

(a):  $\theta_t = 10^\circ, \theta_r = 10^\circ$ ; (b):  $\theta_t = 20^\circ, \theta_r = 20^\circ$

Fig. 9 The relationship between path loss and communication distance under different weather conditions

(a):  $\theta_t = 10^\circ, \theta_r = 10^\circ$ ; (b):  $\theta_t = 20^\circ, \theta_r = 20^\circ$

## 4 结 论

把大气粒子谱分布概念引入无线紫外光散射传输模型, 研究了球形雾霾粒子在不同浓度和不同粒径下对 NLOS 无线紫外光散射传输特性的影响。实验测量了三种不同天气条件下系统的路径损耗, 并与考虑粒子谱分布的仿真结果进行

对比。在实验和仿真条件下, 分析结果表明: (1) 无线紫外光近距离通信条件下, 雾霾天气越严重, 路径损耗越小, 系统性能越好; (2) 通信距离大于 500 m 时, 增加雾霾粒子的浓度, 系统路径损耗总体先减小再增大; (3) 在粒子浓度一定情况下, 随着粒子半径的增大, 路径损耗先减小后增大, 且随着通信距离的增大, 极小值的位置不断向粒子半径小的一侧移动。

## References

- [1] Wu Menglong, Han Dahai, Zhang Xiang, et al. Optics Express, 2014, 22(5): 5423.
- [2] SONG Peng, WAN Jie-feng, CHEN Chong, et al(宋 鹏, 万杰峰, 陈 冲, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2018, 45(5): 7.
- [3] Tang Yinan, Xie Xiaoping, Zhao Wei. IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2012, 12: 567.
- [4] Xu Changming, Zhang Hongming. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 187.
- [5] LIN Yong, XU Zhi-yong, WANG Jing-yuan, et al(林 勇, 徐智勇, 汪井源, 等). Acta Optica Sinica, (光学学报), 2013, 33(9): 0901001.
- [6] Song Peng, Zhou Xianli, Song Fei, et al. Optics Communications, 2017, 405: 401.
- [7] Wu Taifeng, Ma Jianshe, Su Ping, et al. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 242.
- [8] Xu Changming, Zhang Hongming, Cheng Julian. Optics Express, 2015, 23(18): 23261.
- [9] Miffre A, Mehri T, Francis M, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016, 169: 80.
- [10] Zhang Hongxia, Zhai Menran, Sun Jinlu, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2017, 187: 63.
- [11] ZHAO Tai-fei, DUAN Yu-zhen, LI Xing-shan, et al(赵太飞, 段钰桢, 李星善, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2020, 40(15): 1529001.
- [12] RAO Rui-zhong(饶瑞中). Modern Atmospheric Optics(现代大气光学). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2012. 153.
- [13] MAO Jie-tai, ZHANG Jun-hua, WANG Mei-hua(毛节泰, 张军华, 王美华). Acta Meteorologica Sinica(气象学报), 2002, 60(5): 628.
- [14] ZHU Wen-qin(朱文琴). Scientia Atmospherica Sinica(大气科学), 1982, 6(2): 221.

# Study on Scattering Transmission Characteristics of Wireless UV Communication Based on Particle Size Distribution

SONG Peng<sup>1</sup>, CAI Yuan-min<sup>1\*</sup>, GENG Xiao-jun<sup>2</sup>, GUO Hua<sup>1</sup>, JI Han-wu<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qing<sup>3</sup>

1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

2. Electrical & Computer Engineering Department, California State Univ, Northridge, CA 91330, USA

3. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

**Abstract** In the non-line-of-sight wireless ultraviolet communication, particles in the atmosphere scatter ultraviolet light to help transmit information, which offers a broad prospect for applications in near-range covert communication. Haze particles, belonging to the aerosol category, are composed of dust, sulfide, organic hydrocarbon, and other particles in the air. Physical parameters of haze particles, such as size, concentration, and shape, greatly affect the transmission characteristics of wireless ultraviolet light scattering communications. In this work, we first established an ultraviolet multi-scattering model based on the Monte Carlo method. This model considers the effects of two physical quantities of haze particles-radius and concentration. Using this model, we simulated many photons passing through the multi-scattering transmission channel under various haze conditions. The relations of the path loss to particle radius and concentration level are evaluated and analyzed. The results show that: (1) Under the condition of wireless ultraviolet light short-range communication, higher haze concentration results in lower path loss and better system performance; (2) When the communication distance is longer than 500 meters, as the particle concentration continually increases, the system path loss generally decreases first and then increases; (3) With a fixed particle concentration, enlarging the particle radius causes the system path loss to drop initially, but as concentration continues to increase, the path loss rises again. In addition, the particle radius which produces the minimum path loss reduces monotonically as the transmission distance increases. Secondly, we incorporated the particle size distribution of the atmosphere into the model by segmenting the distribution to obtain different particle sizes and corresponding concentrations. Assuming that particles of different sizes and concentrations sequentially scatter photons, the model evaluates the probability of photons arriving at the receiver by passing them through each channel with a single particle size. Then, the model calculates the total probability of photons received and the path loss of the system when particles of all sizes are present. This way, our model creates a realistic multi-scattering transmission environment similar to the actual atmospheric channel where haze particles of all sizes exist simultaneously. Finally, we built an experimental platform to measure the system path loss to communication distance and transmission and receiving elevation angles under three different weather conditions: fine, severe haze, and extremely severe haze. Comparing the measured results of path loss to those from the simulation model, we found that the experimental and simulation results shared the same trend, the communication quality in haze weather is always better than good weather, and larger transmission and reception elevation angles always cause a higher path loss.

**Keywords** Ultraviolet; Haze particles; Size distribution; Path loss

(Received Feb. 26, 2021; accepted May 31, 2021)

\* Corresponding author