

紫外光在烟尘团簇粒子中的散射特性

赵太飞^{1,2*}, 冷昱欣¹, 杨黎洋¹, 张杰³

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

²西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;

³北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 采用烟尘的团簇-团簇凝聚模型和离散偶极子近似方法, 分析了紫外光在不同烟尘浓度和粒子半径下的单次和多次散射信道特性, 以及散射角对散射光强的影响。研究表明, 在紫外光短距离直视通信方式下, 当粒子半径相同时, 随着烟尘浓度的增大, 路径损耗不断增大, 而当烟尘浓度一定时, 路径损耗随着粒径的增大而增大; 在紫外光非直视通信方式下, 短距离时烟尘浓度及原始半径越大, 散射信道路径损耗越小, 而长距离通信时烟尘浓度越高, 其路径损耗越大, 但不同浓度下的路径损耗的差别较小。在多次散射情况下, 散射光强随着散射角的增大而减小, 而当散射角相同时, 烟尘浓度越高, 紫外光的散射光强越大。

关键词 大气光学; 紫外光通信; 烟尘团簇粒子; 路径损耗; 散射光强

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.050103

Characteristics of Ultraviolet Light Scattering by Soot Cluster Particles

Zhao Taifei^{1,2*}, Leng Yuxin¹, Yang Liyang¹, Zhang Jie³

¹ School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China;

² Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of
Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

³ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The cluster-cluster aggregation model of soot and the discrete dipole approximation method are used to analyze the single and multiple scattering channel characteristics of ultraviolet (UV) light under different soot concentrations and particles sizes as well as the influence of scattering angle on the scattering intensity. The research results show that with the UV line-of-sight communication method, the path loss increases with the increase of the soot concentration when the particle radius is the same, meanwhile when the soot concentration is constant, the path loss also increases with the increase of particle size. With the UV non-line-of-sight communication method, the larger the soot concentration and the original radius, the less the path loss of the scattering channels at a short distance. In contrast, at a long distance, the higher the soot concentration, the larger the path loss, however, the difference among path losses for different concentrations is small. In the case of multiple scattering, the scattering light intensity decreases with the increase of scattering angle, while when the scattering angles are the same, the higher the soot concentration, the greater the scattering UV light intensity.

Key words atmospheric optics; ultraviolet light communication; soot cluster particles; path loss; scattering light intensity

OCIS codes 010.1290; 290.5850

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2018-09-21; 录用日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金-中国民航局民航联合研究基金(U1433110)、陕西省重点产业链创新计划(2017ZDCXL-GY-06-01)、陕西省重点研发计划(2017ZDCXL-GY-05-03)、陕西省教育厅服务地方专项计划(17-JF024)、特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(17kftk04)

* E-mail: zhaotaifei@163.com

1 引言

无线紫外光通信是一种以“日盲区”(200~280 nm)的紫外光为载体,并基于大气散射和吸收的无线光通信技术^[1]。其中,大气中的烟尘对工作在紫外波段的通信系统的性能有着不可忽略的影响,特别是在复杂的战场环境下,爆炸或燃烧引起的烟雾以及爆炸所掀起的烟尘均将会对紫外光信号产生衰减、闪烁等效应。烟尘是氧化、升华、蒸发等过程中形成的悬浮于气体中的固体微粒,在烟尘团簇粒子的形成过程中,其原始微粒在相互间的作用下不可避免地发生碰撞,从而集聚在一起形成具有复杂分型结构的团簇粒子^[2-3]。紫外光在烟尘中散射与衰减的研究对烟尘大气环境下紫外光目标探测、跟踪、测距和定位、遥感,以及提高其通信质量等都有着重要的理论和应用价值。

殷金英等^[4]利用分形理论生成了高、低相对湿度下典型形态包覆水层碳黑团聚物,分析了大气气溶胶相对湿度与碳黑粒子等效折射率和半径之间的关系,随着相对湿度增大,枝节状团聚物粒子聚集为密实状,形态变化影响了碳黑团聚物的辐射特性,密实状团聚物辐射特性远大于枝节状团聚物的辐射特性。类成新等^[5]利用蒙特卡罗方法研究了激光信号在随机分布烟尘团簇粒子中的传输衰减特性,指出激光能量的衰减取决于团簇粒子的结构,并与粒子数密度成正比。类成新等^[6]还研究了随机取向烟尘团簇粒子的光学截面的计算,当入射波长一定时,随机取向烟尘团簇粒子的光学性质主要取决于原始微粒的粒径和数目。张小林等^[7]利用离散偶极子近似方法研究了可见光波段下非球形随机取向沙尘气溶胶粒子的光学特性,结果表明,非球形粒子的随机取向并不能使其光学特性严格等效为其等体积球体的

光学特性。冯倩等^[8]研究了可见光波段下非球形沙尘气溶胶散射及其辐射特性,发现具有一定尺度谱和形状分布的随机取向椭球粒子能够模拟自然界中的非球形沙尘粒子散射特性。上述研究主要集中在可见光波段,而紫外光波段烟尘环境下的散射信道特性目前尚未开始研究,因此研究紫外光在烟尘环境下的散射信道特性以及散射对紫外光测量烟尘粒子形态、粒径的影响具有重要的意义。

利用团簇-团簇凝聚(CCA)模型对不同形貌的粒子进行模拟,接着利用离散偶极子近似(DDA)方法,结合紫外光直视(LOS)和非直视(NLOS)散射信道模型,仿真出紫外光在不同烟尘浓度、形态和原始粒径下的散射信道特性。

2 理论基础

2.1 CCA 模型

所研究的烟尘团簇粒子以 CCA 模型为基础,利用计算机仿真模拟,其结果如图 1(a)所示。图 1(b)是在电子显微镜下观察到的已经凝聚的炭黑粒子,可以清晰地显示其凝聚形态。利用 CCA 模型可将分形结构^[9]表示为

$$N = k_f (R_g/\alpha)^{D_f}, \quad (1)$$

式中: N 为烟尘团簇粒子包含的原始微粒的数量; k_f 为分形前向因子; D_f 为分形维数; α 为原始微粒的半径; R_g 为烟尘团簇粒子的平均回旋半径。烟尘团簇粒子的形貌完全由分形维数 D_f 和分形因子 k_f 两个参数决定。

$$R_g^2 = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N r_d^2, \quad (2)$$

式中 r_d 为第 d 个原始微粒到凝聚粒子的质心的距离。

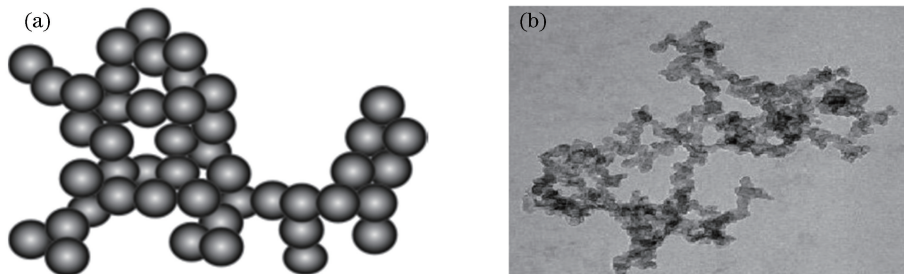


图 1 烟尘团簇粒子。(a)基于 CCA 模拟的烟尘团簇模型;(b)显微镜下的烟尘形态

Fig. 1 Particle aggregation of soot. (a) Soot cluster model based on CCA simulation; (b) soot morphology under microscope

2.2 DDA 方法

DDA 方法是由 Purcell 和 Pennypacker 于 1973

年提出的,是求解电磁散射体积分方程的一种近似方法,也是研究粒子散射特性的重要方法,并最终发

展为一种原则上可应用于任意形状及尺寸的粒子光散射特性的数值计算方法。

DDA 方法的基本思想是:将连续散射体近似为有限个可极化的点阵,每个点通过局域电场的响应获得偶极矩,散射体上所有点在远场的辐射的总和构成散射场。若空间位置 r_j (位置索引 $j, j = 1, 2, \dots, N_0, N_0$ 为偶极子个数) 处的电场为 E_j (入射电场 $E_{inc,j}$ 与其他 $N_0 - 1$ 个偶极子的散射场的总和), 每个偶极子的偶极矩表示为 $P_j = \alpha_j E_j$, 极化率为 α_j , $-A_{jl}P_l$ 表示在 r_l 处偶极子 P_l 产生的电场, 同时考虑相位迟滞作用, 由此可得在 r_j 点的偶极矩 P_j [10] 为

$$P_j = \alpha_j E_j = \alpha_j (E_{inc,j} - \sum_{i \neq j} A_{ji} P_i), \quad (3)$$

系数 A_{jl} 为 3×3 矩阵,

$$A_{jl} = \frac{\exp(ikr_{jl})}{r_{jl}} [k^2 (\hat{r}_{jl} \hat{r}_{jl} - I_3) + \frac{ikr_{jl} - 1}{r_{jl}^2} (3 \hat{r}_{jl} \hat{r}_{jl} - I_3)], \quad (4)$$

式中:波数 $k = 2\pi/\lambda$; λ 为入射波长; $\hat{r}_{jl} = (r_j - r_l)/r_{jl}$ 为在第 j 和 l 个偶极子之间方向的单位矢量; $r_{jl} = |r_j - r_l|$ 为 r_j 和 r_l 点之间的距离; I_3 为 3×3 单位矩阵, (4) 式为 $j \neq l$ 时 A_{jl} 的表达式。若 $j = l$, $A_{jj} \equiv a_j^{-1}$, 则偶极矩 P_j 满足

$$\sum_{l=1}^{N_0} A_{jl} P_l = E_{inc,j}. \quad (5)$$

由(5)式可解出 P_l , 求得 P_l 后可以得到散射系数以及消光系数等散射体的所有散射特征量。

在理论计算中, 大气的散射消光系数与粒子数量浓度直接相关, 而在实际大气环境中通常给出了粒子的质量浓度, 因此需要建立适当的理论模型来实现二者之间的转换 [11], 即将大气的质量浓度转换成与粒子相关的数量浓度,

$$W = \frac{\pi}{6} G D_a^3 N 10^{-9}, \quad (6)$$

式中: W 为粒子的质量浓度, 单位为 g/m^3 ; G 为粒子的比重, 沙尘的取值是 $2.65 \times 10^6 g/m^3$, 因为烟尘粒径比沙尘小很多, 且烟尘主要是飘在空中的, 因此比重较小, 故将烟尘的比重取值为 $1 \times 10^6 g/m^3$; D_a 为粒子的平均粒径, 单位为 mm 。

根据 DDA 理论, 满足一定尺度分布的气溶胶粒子的衰减系数、散射系数和吸收系数都可表示为 [12]

$$K_{ext} = N \int_0^\infty \pi \alpha^2 Q_{ext}(\alpha) n(\alpha) d\alpha, \quad (7)$$

式中: $n(\alpha)$ 为粒子的尺度谱分布; Q_{ext} 为单个粒子的消光效率因子, 对不同形态可采用 DDA 方法求出, 然后利用(7)式可求出多粒子粒径下的散射消光系数。

2.3 无线紫外光散射信道模型

紫外光 LOS 通信散射特性的分析, 采用紫外光单次散射信道模型, 综合考虑在自由空间中的路径损耗、大气衰减, 以及探测器的接收增益, 得到 LOS 通信链路接收光功率的表达式 [13] 为

$$P_{r,LOS} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \exp(-K_e r) \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \quad (8)$$

式中: $\exp(-K_e r)$ 为大气衰减; P_t 为发射功率; r 为通信距离; K_e 为大气信道的衰减系数, 可表示为 $K_e = K_s + K_a$, 其中 K_s 和 K_a 分别为散射系数和吸收系数; A_r 为接收孔径面积。

紫外光 NLOS 通信中, 不能直接计算接收端的接收光功率, 要将其看作两段直视链路, 因此 NLOS 通信链路接收光功率的表达式 [14] 为

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2} \right)} \exp \left[-\frac{K_e r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right], \quad (9)$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别为发送和接收仰角; ϕ_1 和 ϕ_2 分别为发送端发散角和接收端视场角; P_s 为散射角 θ_s 的相函数, 且 $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$ 。

在实际的紫外光通信中, 大气中多数光子都不会只经过一次散射就到达接收端, 而是需要经过多次散射的综合作用才能到达。对非直视多次散射特性的计算分析可利用蒙特卡罗方法来完成, 将散射次数最多设为 5 次, 具体的多次散射传播模型如图 2 所示 [15]。

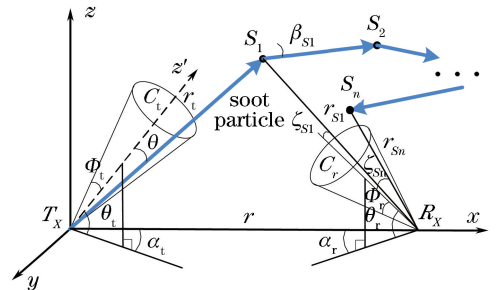


图 2 烟尘的多次散射信道模型

Fig. 2 Model for multiple scattering channel of soot

在图 2 中, 发射端固定在原点位置, 接收端固定在 x 轴正半轴上, 收发端之间的通信距离为 r 。 θ_t 和 ϕ_t 分别表示发射端仰角和发散角半角, θ_r 和 ϕ_r

分别表示接收端仰角和视场角半角。 C_t 和 C_r 分别表示发射光束与接收视场所形成的锥体。 α_t 为 C_t 的偏转角, α_r 为 C_r 的偏转角。 S_n 为第 n 次散射的散射点, r_t 为发射端到 S_1 的距离, r_{s1} 为 S_1 到接收端的距离, r_{sn} 为 S_n 到接收端的距离。 ζ_{sn} 为 S_n 与接收端的连线与 C_r 中心轴的夹角, β_{sn} 为光子在 S_n 点入射方向与光子散射后传播方向的夹角。

在蒙特卡罗模型下,光子在烟尘环境下的散射以及消光等系数的计算可借助于 DDA 方法,将该系数与蒙特卡罗模型相结合即可得到紫外光在烟尘环境下的散射信道特性。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 $P_n = W_n P_{1n} P_{2n}$, 其中 W_n 表示光子到达 S_n 前存活概率, $W_n^{[15]}$ 可表示为

$$W_n = (1 - P_{n-1}) \exp(-k_a |S_n - S_{n-1}|) W_{n-1}, \quad (10)$$

式中 k_a 为大气吸收系数。 P_{1n} 为光子经过 S_n 点散射,能指向接收面的概率^[15]:

$$P_{1n} = \frac{A_r \cos \zeta_{sn}}{4\pi r_{sn}^2} P(\cos \beta_{sn}), \quad (11)$$

式中 A_r 为接收端的接收孔径面积, $P(\cos \beta_{sn})$ 为第 n 次散射的相函数。 P_{2n} 为光子经过 S_n 点散射后能够传输 ΔS_n 随机步长的概率:

$$P_{2n} = \exp(-k_e \Delta S_n). \quad (12)$$

假设发射的光子数为 M , 每个光子最多经历 L 次散射,则接收端的脉冲响应^[15]可表示为

$$h(t_i) = \sum_{k=1}^M \sum_{[n=1, t_i - (Dt/2) < t_n < t_i + (Dt/2)]}^L \frac{P_{kn}}{MDt}, \quad (13)$$

式中 P_{kn} 为第 k 个光子经过第 n 次散射到达接收端的概率, P_{kn} 可由(12)式求得。设 Δt 为两个时间节点之间的间隔,如果 $t_i - (\Delta t/2) < t_n < t_i + (\Delta t/2)$, 说明光子在第 i 个时间间隔被接收端所探测。

同理,路径损耗的计算同样采用概率的方法,非直视紫外光通信系统的路径损耗可表示为

$$PL = 10 \lg \left(\frac{M}{M \times P} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{P} \right), \quad (14)$$

式中 M 为发射端发出的光子数,能够到达接收端的光子数为 $M \times P$, P 为发射端发射一个光子能到达接收端接收面的平均概率,可表示为

$$P = \frac{\sum_{m=1}^M (P_s)_m}{M}, \quad (15)$$

式中 $(P_s)_m$ 为第 m 个光子最多经过 S 次散射能到达接收端接收面的总概率,其中 P_s 是一个光子最

多经过 S 次散射能到达接收端接收面的总的概率,可表示为

$$P_s = \sum_{s=1}^S P_s. \quad (16)$$

2.4 DDA 方法与 Mie 散射方法比较

当空气中存在大微粒,如水滴、灰尘和污染物颗粒时,光散射较为复杂^[16],常使用 Mie 散射方法解决粒子光散射问题。取紫外光波长 λ 为 265 nm,发射功率为 0.6 mW,该波长对应的复折射率^[10]为 $m_0 = 1.07 + 0.688i$,使用 Mie 散射和 DDA 方法分别仿真不同粒子粒径下散射系数的变化情况,仿真结果如图 3 所示。可以看出,当复折射率和粒子粒径给定时,采用 Mie 散射理论和 DDA 方法计算单球粒子散射时其散射系数数值非常接近,因此采用 DDA 方法计算紫外光在烟尘环境中的散射问题亦是非常合理的。

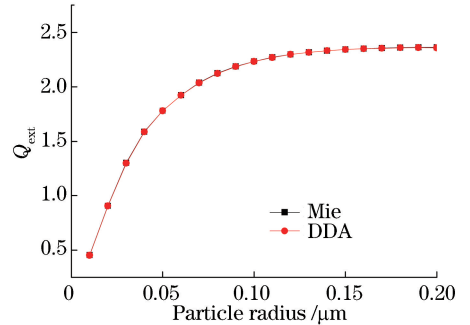


图 3 不同粒径下散射系数的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of scattering coefficients under different particle sizes

3 仿真结果分析

战场环境中烟尘环境下烟雾粒子的直径范围为 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$, 平均直径约为 $0.7 \mu\text{m}$ 。计算中,将烟尘团簇粒子的原始单球粒子半径 α 分别取为 20, 50, 80 nm, 烟尘质量浓度分别为 10, 50, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 烟尘团簇粒子经过原始单球粒子凝聚达到该浓度时烟尘粒子的半径为 $0.4 \sim 2 \mu\text{m}$ 。入射波长 λ 为 265 nm, 发射功率为 0.6 mW, 该波长下烟尘团簇粒子的复折射率^[10] $m_0 = 1.07 + 0.688i$, 随机取向烟尘团簇粒子的分形维数 $D_f = 2$, 分形因子 $k_f = 2.5$ 。图 4 表示烟尘球形粒子原始半径 $\alpha = 20 \text{ nm}$ 时, 不同烟尘浓度下的紫外光非直视单次散射信道特性, 非直视通信时收发仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$ 。

由图 4 可知,不同烟尘浓度下的路径损耗都随着通信距离的增大而增大,且当通信距离

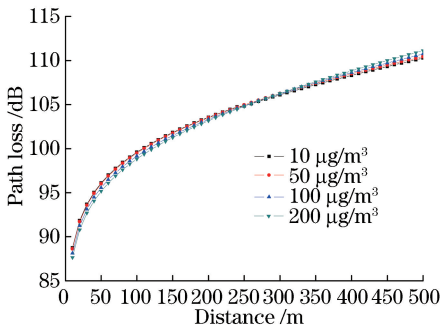


图4 球形烟尘粒子在不同浓度下的路径损耗
Fig. 4 Path losses of spherical soot particles under different concentrations

小于 250 m 时, 烟尘浓度越大紫外光通信质量越好;

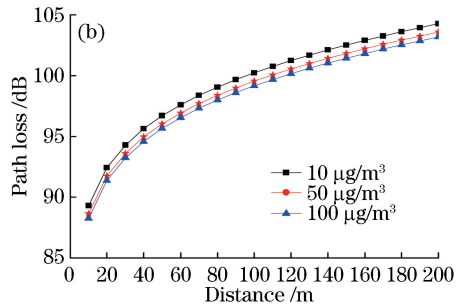
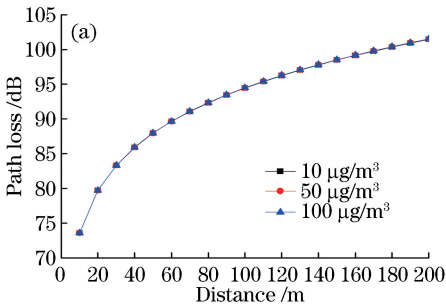


图5 不同粒子浓度下通信距离对路径损耗的影响。(a)球形直视通信;(b)球形非直视通信

Fig. 5 Influence of communication distance on path loss under different particle concentrations.

(a) Spherical particle LOS communication; (b) spherical particle NLOS communication

由图 5(a)可知,在紫外光直视通信中,当烟尘团簇粒子半径和通信距离相同时,不同烟尘浓度下的散射信道特性相差不大。原因是,在直视通信中,信道的散射特性主要由消光系数决定,随着烟尘浓度的增大,消光系数不断增大,故其路径损耗不断减小,由于消光系数差异很小,因此其信道的路径损耗数值差异很小。而紫外光非直视通信与可见光通信不同,非直视通信主要依靠粒子在大气中的散射作用实现,因此其散射系数越大通信质量越佳。当距

离较短($<250\text{ m}$)时,烟尘信道的路径损耗随着浓度的增大而减小。原因在于随着烟尘浓度的不断增大,其散射系数呈现增大的趋势,且浓度较低时,散射系数增大得较快,因此在低浓度时,其散射作用较差,故其散射信道的路径损耗较大;而随着浓度的继续增大,散射系数增大的速率较小,因此路径损耗相差越来越小,故其信道特性差异越小。

图 6 为烟尘团簇粒子在相同分形维数及分形前向因子下,相同烟尘浓度在不同原始半径下的紫外

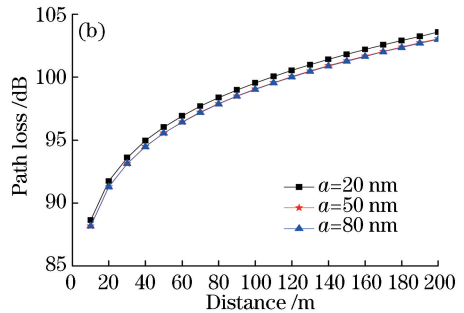
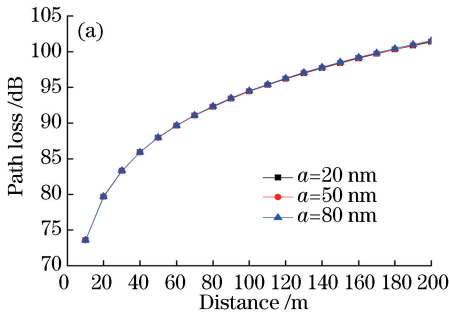


图6 不同粒子半径下通信距离对路径损耗的影响。(a)球形直视通信;(b)球形非直视通信

Fig. 6 Influence of communication distance on path loss under different particle radii.

(a) Spherical particle LOS communication; (b) spherical particle NLOS communication

光单次散射信道特性, 烟尘质量浓度为 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 非直视通信时收发仰角 $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$ 。

由图 6(a)可知, 短距离紫外光直视通信时, 在烟尘团簇浓度和通信距离相同时, 不同粒径下的散射信道特性差别很小, 这与图 5(a)的结果类似。随着粒径不断增大, 消光系数不断增大, 因此路径损耗随着原始粒径的增大而增大。但是由于不同粒径下的消光系数相差很小, 因此其信道的路径损耗相差很小。由图 6(b)可知, 在短距离非直视紫外光通信中, 当粒径较小时, 消光作用以吸收作用为主, 且随着原始粒子半径不断增大, 散射系数在消光系数中的占比不断增大, 吸收系数的占比不断减小, 即散射

作用不断占据主导地位, 而紫外光非直视通信与可见光通信不同, 非直视通信主要依靠粒子在大气中的散射作用实现, 因此其散射系数越大通信质量越佳, 故当粒子半径较小时, 通信质量较差。此外, 随着粒子半径的继续增大, 散射系数虽然继续增大, 通信质量同样有一定改善, 但差异却并不明显。

目前, 烟尘散射特性研究广泛采用的形态是球形, 但是大气中的烟尘粒子并非严格的球形, 粒子经过摩擦作用后, 大多呈非球形^[17], 因此对烟尘非球形粒子选取纵横比为 2 的椭球形进行分析研究, 图 7、8 的仿真环境分别与图 5、6 相同。

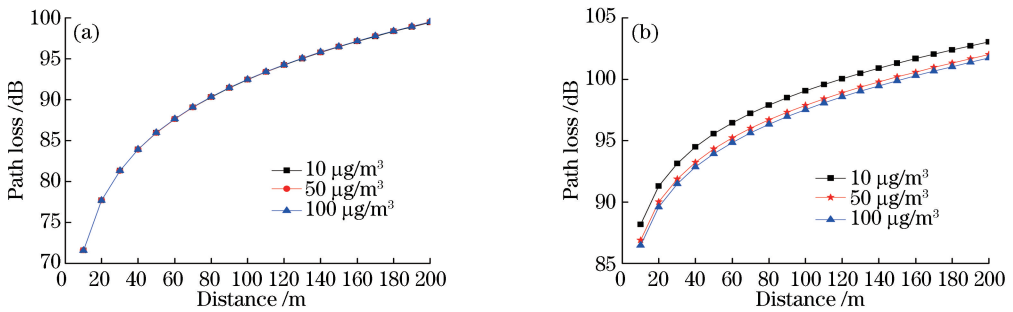


图 7 不同烟尘浓度下通信距离对路径损耗的影响。(a)椭球直视通信;(b)椭球非直视通信
Fig. 7 Influence of communication distance on path loss under different soot concentrations.
(a) Ellipsoidal particle LOS communication; (b) ellipsoidal particle NLOS communication

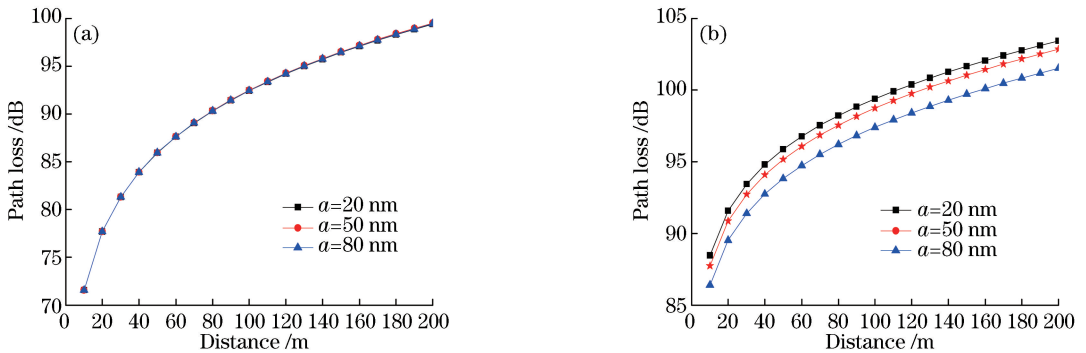


图 8 不同粒子半径下通信距离对路径损耗的影响。(a)直视通信;(b)非直视通信
Fig. 8 Influence of communication distance on path loss under different particle radii.
(a) LOS communication; (b) NLOS communication

由图 7(a)可知, 各向同性椭球形烟尘粒子的散射信道特性与球形粒子相类似, 在短距离直视通信时, 路径损耗同样随着烟尘浓度的增加而增大, 但由于消光系数变化不明显, 其直视链路的路径损耗变化非常小, 因此随着粒子个数的增加, 路径损耗虽然在一定程度上有所减小, 但是差异很小, 3 条线几乎完全重叠。如图 7(b)所示, 在短距离紫外光非直视通信方式下, 路径损耗由消光系数和散射系数共同

决定, 随着烟尘浓度不断增大, 粒子个数不断增多, 故散射系数不断增大, 且非直视通信主要依靠紫外光的散射特性实现, 因此路径损耗随烟尘浓度的增大而减小, 此时紫外光的通信性能有了一定程度的提高。当通信距离相同时, 对比烟尘球形和椭球形粒子可以看到, 椭球形粒子的路径损耗明显小于球形粒子, 原因在于球形粒子的散射截面大于椭球型粒子, 能够提高入射光的衰减效率, 因此球形粒子的

路径损耗较大。

由图 8 可知,当烟尘浓度一定时,各向同性椭球形烟尘粒子的散射信道特性与球形粒子类似,短距离直视通信时,路径损耗随着烟尘粒子原始半径的增大而不断增大,但由于消光系数变化很小,因此其直视通信时的路径损耗变化非常小,即 3 条线几乎完全重叠。在紫外光非直视通信方式下,路径损耗由消光系数和散射系数共同决定,散射系数对紫外光非直视通信的影响较大,因此随着粒子半径的增大,路径损耗呈现减小趋势。当通信距离和烟尘粒子半径相同时,对比烟尘球形和椭球形粒子可以看到,椭球形粒子的路径损耗同样明显小于球形粒子。

当粒子原始半径 $\alpha = 20 \text{ nm}$ 时,利用蒙特卡罗方法研究了紫外光在不同烟尘浓度下散射角和散射光强的关系,如图 9 所示。其中,发射光子数 $M = 10^5$,通信距离为 100 m ,散射次数 $n = 5$,并利用接收到的光子能量表征信道的散射光强分布。

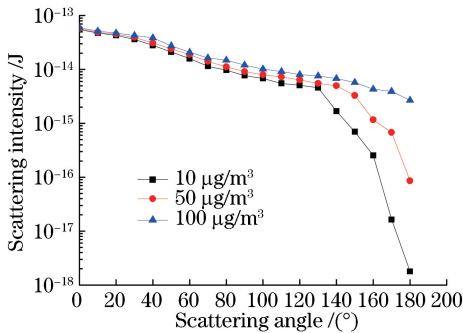


图 9 不同烟尘浓度下的散射光强分布

Fig. 9 Scattering light intensity distributions under different soot concentrations

由图 9 可知,3 种浓度下散射光强均随着散射角的增大而减小,在散射角相同时,高浓度烟尘环境下紫外光的散射光强高于中低浓度。原因在于,当通信距离相同时,高浓度烟尘中其散射作用较另外两种烟尘环境强,而吸收作用较另两种环境弱,因此其通信性能较好,这与前面紫外光在 100 m 时非直视通信的仿真结果相同。当散射角较小时,3 种烟尘浓度下的散射光强差别较小,主要原因在于散射角较小时,其有效散射体不断增大,散射作用占了主导地位,然而 3 种环境下的散射系数相差不大,因此其散射光强相差得很不明显。另外,随着散射角的继续增大,有效散射体在逐渐减小,光子到达接收端需要经多次散射,而高烟尘浓度下的散射系数较另两种浓度大,因此其散射光强更大。

4 结 论

利用 CCA 生长模型和 DDA 方法研究了紫外光在直视和非直视两种通信方式中不同浓度和不同粒径下烟尘粒子的散射信道特性,利用蒙特卡罗方法研究了不同烟尘浓度和粒径下的紫外光散射角和散射光强分布。结果表明:紫外光在短距离直视通信时,其通信效果在不同浓度和半径下相差不大,即路径损耗较接近;而在短距离非直视通信中,其路径损耗随着烟尘粒子粒径和浓度的增大而减小,此时烟尘浓度较高时反而有利于紫外光通信,且球形烟尘粒子的损耗大于椭球形烟尘粒子;在长距离紫外光非直视通信中,烟尘浓度越高,路径损耗越大,越不利于紫外光通信。本研究计算路径损耗时只考虑单次散射,随着浓度增加误差较大,所以仅适用于较低浓度的烟尘团簇粒子散射分析。后续的研究可集中于紫外光在烟尘环境中的实测实验上。

参 考 文 献

- [1] Song P, Zhou X L, Zhao T F, *et al.* Node design and analysis of communication performance between nodes in ultraviolet mobile ad hoc networks[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0306004.
宋鹏, 周显礼, 赵太飞, 等. 紫外光移动自组网节点设计及通信性能分析[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0306004.
- [2] Dobbins R A, Megaridis C M. Morphology of flame-generated soot as determined by thermophoretic sampling[J]. Langmuir, 1987, 3(2): 254-259.
- [3] Holler S, Auger J C, Stout B, *et al.* Observations and calculations of light scattering from clusters of spheres[J]. Applied Optics, 2000, 39(36): 6873-6887.
- [4] Yin J Y, Zheng Y N, Yang H Y, *et al.* Effect of relative humidity of atmospheric aerosol on radiation properties of soot aggregate[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0529001.
殷金英, 郑宇浓, 杨洪艳, 等. 大气气溶胶相对湿度影响碳黑团聚物辐射特性分析[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0529001.
- [5] Lei C X, Wu Z S, Zhang H F, *et al.* Attenuation characteristics of laser in the randomly distributed soot agglomerates[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(6): 1021-1025.
类成新, 吴振森, 张化福, 等. 激光在随机分布烟尘团簇粒子中的衰减特性[J]. 光子学报, 2010, 39

- (6): 1021-1025.
- [6] Lei C X, Liu H F, Zhang H F. Numerical calculation of optical cross sections of randomly oriented soot clustered agglomerates [J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2010, 27(1): 183-186.
类成新, 刘汉法, 张化福. 随机取向烟尘团簇粒子的光学截面的数值计算 [J]. *原子与分子物理学报*, 2010, 27(1): 183-186.
- [7] Zhang X L, Mao M. Orientation-averaged optical properties of nonspherical dust aerosols [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2017, 29(1): 16-22.
张小林, 毛毛. 随机取向非球形沙尘气溶胶粒子的光学特性 [J]. *光散射学报*, 2017, 29(1): 16-22.
- [8] Feng Q, Zou B, Zhao W. Theoretical simulation of scattering and radiative properties of nonspherical dust aerosols at visible wavelength [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(1): 1-10.
冯倩, 邹斌, 赵崑. 可见光波段非球形沙尘气溶胶散射和辐射特性的理论模拟 [J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(1): 1-10.
- [9] Tao P P. Research on particle structure and optical properties of soot agglomeration [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
陶培培. 烟尘凝聚粒子结构与光学性质的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [10] Lei C X, Wu Z S. Light extinction of randomly oriented smoke screen with clustered agglomerates [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2010, 27(4): 593-597.
类成新, 吴振森. 随机取向烟幕凝聚粒子的消光特性 [J]. *计算物理*, 2010, 27(4): 593-597.
- [11] Dong Q S. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, 12(1): 15-25.
董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性 [J]. *电波科学学报*, 1997, 12(1): 15-25.
- [12] Wang H X, Zhu Y Z, Tian T, *et al.* Characteristics of laser transmission in different types of aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024214.
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214.
- [13] Xu Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007: 577-580.
- [14] Zhao T F, Leng Y X, Zhao S T, *et al.* Research on ultraviolet scattering characteristics of haze particles [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 837-843.
赵太飞, 冷显欣, 赵思婷, 等. 雾霾粒子的紫外光散射特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 837-843.
- [15] Ding H P, Xu Z Y, Sadler B M. A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010, 2010(1): 598572.
- [16] Ma Y, Wang L J, Yu J, *et al.* Aerosol concentration measurement based on near-forward light scattering method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 092901.
马英, 王龙江, 俞杰, 等. 基于近前向光散射法的气溶胶浓度测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 092901.
- [17] Xing J, Sun X G, Yuan G B, *et al.* Backscattering spectrum analysis of nonspheroid soot particle [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2239-2242.
邢键, 孙晓刚, 原桂彬, 等. 非球形烟尘粒子后向散射场的光谱分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2239-2242.