

doi:10.3788/gzxb20184705.0506004

雾霾天气对紫外光通信的影响

宋鹏^{1,2}, 万杰峰¹, 陈冲¹, 赵太飞^{2,3}, 李云红¹

(1 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

(2 西安理工大学 陕西省复杂控制与智能信息处理重点实验室, 西安 710048)

(3 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

摘 要:在紫外光传输模型的基础上,基于米散射和瑞利散射理论,分析了大气分子和气溶胶粒子对紫外光的吸收和散射特性.利用蒙特卡洛方法仿真分析了良好、严重雾霾、极严重雾霾三种天气条件下的紫外光通信系统路径损耗和误码率.使用波长为 255 nm 的“日盲”紫外 LED 及光电倍增管作为收发器件,发射信号采用 10 kHz 和 100 kHz 的方波信号,在三种不同天气情况下进行户外短距离紫外光通信实验.实验结果表明:在通信距离小于 100 m 条件下,随着雾霾污染程度的加重,紫外光直视通信路径损耗逐渐增大,紫外光非直视通信路径损耗逐渐减小.在进行非直视紫外光通信时,发射光功率为 0.6 mW 时,收发端仰角小于 20°,通信距离小于 40 m,通信质量相对较好.

关键词:大气光学;光通信;蒙特卡洛仿真;紫外光;路径损耗;误码率;非直视

中图分类号:TN929.12

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0506004-10

Effects of Fog and Haze on Ultraviolet Communication

SONG Peng^{1,2}, WAN Jie-feng¹, CHEN Chong¹, ZHAO Tai-fei^{2,3}, LI Yun-hong¹

(1 School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(2 Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3 Department of Electronics Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the model of ultraviolet communication transmission, the absorption and scattering characteristics of ultraviolet communication were analyzed based on the Mie scattering and Rayleigh scattering theory. The impact of different path loss and bit error rate were simulated on the basis of Monte Carlo method under the condition of fine weather, severe fog and haze weather, extremely severe fog and haze weather. Using a 255nm ultraviolet LED as the light source, a photomultiplier as the receiving device and a 10 kHz and 100 kHz square wave signal as the transmitting signal, outdoor short distance ultraviolet communication experiment under three different weather conditions were performed. The experimental results indicate that under the condition of communication distance less than 100 m, with the increasing of fog and haze pollution, the path loss of line-of-sight ultraviolet communication increases gradually, and the path loss of non-line-of-sight ultraviolet communication decreases gradually. In non-line-of-sight ultraviolet communication, when the transmitting power is 0.6 mW, the transmitting and receiving elevation angles are less than 20° and the communication distance is less than 40 m, the communication quality is relatively better.

Key words: Atmospheric optics; Optic communication; Monte Carlo simulation; Ultraviolet; Path loss;

基金项目:国家自然科学基金委员会—中国民航局民航联合研究基金(No.U1433110),陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室(西安理工大学)开放课题基金(No.2016CP05),陕西省科技厅工业科技攻关项目(No.2016GY-101)和陕西省科技厅自然科学基金计划—重点项目(No.2016JZ026)资助

第一作者:宋鹏(1976—),男,副教授,博士,主要研究方向为紫外光通信等.Email:pengsong916@126.com

收稿日期:2017-11-17; **录用日期:**2018-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

Bit error rate; Non-line-of-sight

OCIS Codes: 060.2605; 010.1300; 260.7190; 010.1310

0 引言

紫外光(Ultraviolet, UV)通信通常采用波长为 200~280 nm 的波段,该波段的紫外辐射被臭氧分子强烈吸收,使得这一波段的紫外光光强在近地表面几乎为零,因而该波段被称为“日盲区”^[1-2].日盲波段紫外光通信可以采用直视(Line-Of-Sight, LOS)和非直视(Non-Line-Of-Sight, NLOS)两种通信方式,非直视紫外光通信利用大气分子和气溶胶粒子对紫外光的散射作用实现信息的传输,克服了自由空间光通信必须在直视条件下才能进行通信的不足^[3-6].紫外光通信具有保密性好、抗干扰能力强、全天候工作、可非直视传输等优点,在无人机的编队飞行、保密通信等领域有广阔的应用前景^[7-10].

不同天气条件下,大气中粒子的浓度、粒径和收发端几何参数等发生变化时,紫外光通信系统的路径损耗和误码率必将随之变化,因此,对紫外光在不同天气条件下的传输特性进行分析具有重要意义.文献[11]利用蒙特卡洛方法模拟了光子传输的全过程,建立了非直视非共面紫外光多次散射模型,给出了紫外光通信系统脉冲响应的计算方法,分析了系统脉冲展宽与多次散射、收发端仰角、发散角、视场角、偏轴角等收发端几何参数之间的关系.文献[12]基于非直视紫外光多次散射模型结合米散射拟合函数,并利用蒙特卡洛法仿真了雾霾粒子浓度和尺寸对紫外光通信路径损耗的影响.文献[13]分析了不同海拔的大气散射区域对紫外光单次散射链路的影响,分析了通信距离、仰角以及发散角三者的相互关系,但是没有分析不同天气条件下通信距离和收发仰角的变化对通信系统的影响.文献[14]基于蒙特卡洛法建立了多次散射模型,并利用该模型对雾环境下非直视大气散射光通信传输特性进行了模拟分析,但是没有对雾霾天气下的系统通信性能进行分析.文献[15]依据雾霾天气条件下大气对光子的散射和吸收理论,研究了重度雾霾天气下黑碳气溶胶浓度和相对湿度对紫外光通信性能的影响,但是没有研究不同天气条件下的路径损耗和误码率对系统通信性能的影响.文献[16]通过单次散射信道模型,基于米散射理论,仿真分析了紫外光传输过程中不同天气条件对系统传输性能的影响,但是没有分析不同天气情况下的路径损耗和误码率,同时缺少相应的实验验证.

本文依据米散射和瑞利散射理论,基于蒙特卡洛方法,建立了紫外光散射链路模型,研究了良好、严重雾霾和极严重雾霾三种天气条件下短距离紫外光通信在大气中的传输性能,仿真分析了不同天气条件下通信系统的路径损耗和误码率分别与通信距离和收发端仰角之间的关系,并在三种天气条件下进行了户外短距离紫外光通信实验.

1 大气粒子对紫外光传输特性的影响

1.1 紫外光通信模型

1.1.1 直视紫外光通信模型

紫外光直视通信模型如图 1,采用窄发散角发送,宽视场角接收, T_x 是发射端, R_x 是接收端, r 为通信距离.发射端发出的光子主要经过直视路径传输到达接收端,经单次和多次散射传输到达接收端的光子的能量在接收端收到的总能量中所占比例较小.

紫外光在大气中直视传输,路径损耗与 r^2 成正比,大气粒子对紫外光的衰减可表示为 $e^{-k_e r}$,接收端的探测器增益为 $4\pi A/\lambda^2$,其中 λ 为波长, k_e 是大气消光系数, A 为接收端接收孔径的面积.紫外光直视通信接收端收到的光功率可表示为^[17]

$$P_{R,LOS} = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 e^{-k_e r} \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (1)$$

路径损耗 P_L 可表示为

$$P_L = \frac{P_T}{P_{R,LOS}} = \frac{4\pi r^2}{A \exp(-k_e r)} \quad (2)$$

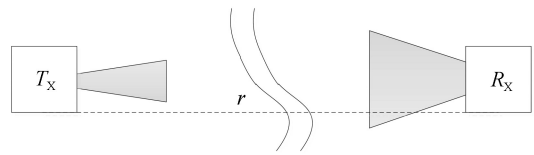


图 1 直视紫外光通信模型

Fig.1 LOS UV communication model

式中, P_T 是发射端发出的光功率, $P_{R,LOS}$ 是接收端收到的光功率.

1.1.2 非直视紫外光通信模型

非直视紫外光通信利用发射端发出的光锥与接收端视场锥体在空中形成公共散射体, 发射端发出的光子经公共散射体散射后能绕过障碍物到达接收端, 实现收发端之间的非直视通信^[18].

在实际的非直视紫外光通信实验中, 接收端收到的光子是单次和多次散射共同作用的结果. 多次散射是指收发端之间经过 2 次、3 次甚至更多次散射实现通信, 而单次散射是指收发端之间仅通过 1 次散射实现通信, 它是多次散射的一种特殊情况. 本文通过蒙特卡洛方法对光子在大气中多次散射的传播过程进行了仿真建模, 非直视紫外光通信多次散射模型如图 2^[11].

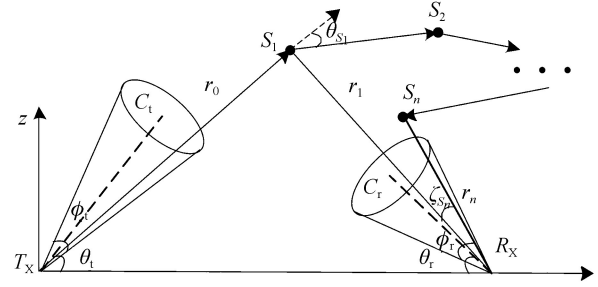


图 2 非直视紫外光通信多次散射模型
Fig.2 NLOS UVcommunication multiple scattering model

图 2 中, T_x 是发射端, R_x 是接收端, r 为通信距离. θ_t 是发射端仰角, θ_r 是接收端仰角. φ_t 和 φ_r 分别是发射端发散角和接收端视场角. C_t 和 C_r 分别表示发射光束和接收视场所形成的锥体. S_1, S_2, \dots, S_n 是散射点, θ_{s_1} 为光子在散射点 S_1 处的入射方向与光子散射后传播方向的夹角. r_0 是发射端光子到散射点 S_1 的距离, r_1 是 S_1 到接收端的距离, r_n 是 S_n 到接收端的距离.

1.2 发射光子

由 T_x 发射的光子经过大气传输将会到达散射点 S_1 , 传输的距离为 r_0 , r_0 服从参数为 $1/k_e$ 的指数概率密度函数的随机抽样, r_0 可表示为^[19]

$$r_0 = -\frac{\ln \xi^{(r)}}{k_e} \quad (3)$$

式中, $\xi^{(r)}$ 是在 $(0, 1)$ 区间服从均匀分布的随机数, k_e 是大气消光系数, 它是吸收系数和散射系数之和, 可表示为 $k_e = k_a + k_s$, 其中 $k_a = k_{a_Ray} + k_{a_Mie}$, $k_s = k_{s_Ray} + k_{s_Mie}$, k_{a_Ray} 是瑞利吸收系数, k_{a_Mie} 是米氏吸收系数, k_{s_Ray} 是瑞利散射系数, k_{s_Mie} 是米氏散射系数.

1.3 大气吸收和散射系数

大气分子的直径远小于紫外光波长, 符合瑞利散射的条件, 大气分子对紫外光的散射可以用瑞利散射理论来处理, 大气分子的瑞利散射系数可表示为^[20-21]

$$k_{s_Ray} = \frac{8\pi^3}{3} \frac{[n(\lambda) - 1]^2}{\lambda^4 N} \frac{6(1 + \delta)}{6 - 7\delta} \left(3 + \frac{1 - \delta}{1 + \delta} \right) \quad (4)$$

式中, N 表示散射体的粒子数密度, $n(\lambda)$ 表示大气的折射率, δ 表示退偏振项. 在标准大气下, $N = 2.54 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, $\delta = 0.035$.

标准大气下的折射率可表示为^[21]

$$[n_0(\lambda) - 1] \times 10^8 = 8060.51 + \frac{2480990}{132.274 - \lambda^{-2}} + \frac{17455.7}{39.32957 - \lambda^{-2}} \quad (5)$$

式中, λ 为波长, 单位是微米.

气溶胶粒子的直径大于紫外光波长, 符合米氏散射的条件, 气溶胶粒子对紫外光的散射作用可以用米氏散射来处理, 米氏散射系数 k_{s_Mie} 和吸收系数 k_{a_Mie} 可表示为^[21]

$$k_{s_Mie} = \frac{3.91}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (6)$$

$$k_{a_Mie} = N_a Q_a(R) \pi R^2 \quad (7)$$

式中, R_v 是能见度, 单位是 km; λ 为波长, 单位是 nm. $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, $q = 0.585 R_v^{1/3}$ 为修正因子. R 是粒径, N_a 是大气气溶胶粒子浓度, Q_a 是该尺寸下粒子的吸收效率因子.

1.4 散射相函数

散射相函数反映了大量光子经过散射体散射后在不同方向上发出光子数量的多少. 光子在散射点 S_1 处

发生散射,若散射体的尺寸远小于入射紫外光波长时,则发生瑞利散射.瑞利散射的散射相函数可表示为^[22-23]

$$P_{\text{Ray}}(\cos \theta_s) = \frac{3[1+3\gamma+(1-\gamma)\cos^2 \theta_s]}{4(1+2\gamma)} \quad (8)$$

若散射体的尺寸与紫外光波长相当时,发生米散射.米散射的散射相函数可表示为^[23]

$$P_{\text{Mie}}(\cos \theta_s) = (1-g^2) \left[\frac{1}{(1+g^2-2g\cos \theta_s)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\cos^2 \theta_s - 1)}{(1+g^2)^{3/2}} \right] \quad (9)$$

式中, γ 、 g 和 f 是模型参数.

紫外光在大气中传输时,瑞利散射和米散射均有可能发生,在本文中散射相函数用瑞利散射和米散射相函数的加权求和,相函数可表示为^[24]

$$P(\cos \theta_s) = \frac{k_{s,\text{Ray}}}{k_s} P_{\text{Ray}}(\cos \theta_s) + \frac{k_{s,\text{Mie}}}{k_s} P_{\text{Mie}}(\cos \theta_s) \quad (10)$$

1.5 光子到达接收端的概率

在散射中,一个光子要到达接收端,必须同时满足三个条件:散射点在接收端视场角范围内;光子散射后的传输方向指向接收端的接收面;光子能传播散射点到接收端的距离^[11].

光子从 T_x 到达散射点 S_1 后与大气分子或者气溶胶粒子碰撞发生散射,散射角 θ_{S_1} 由散射相函数决定,可得

$$\xi^{(s)} = 2\pi \int_{-1}^{\epsilon_{S_1}} P(\mu) d\mu \quad (11)$$

式中, $\epsilon_{S_1} = \cos \theta_{S_1}$, $\xi^{(s)}$ 是 0 到 1 之间均匀分布的随机变量, $P(\mu)$ 为散射相函数.

若散射点 S_n 在接收端视场角范围内,即 $\zeta_{S_n} < \varphi_r/2$,光子就有可能被接收.光子经过散射点后,能指向接收面的概率为

$$P_{1n} = \frac{A \cos \zeta_{S_n}}{4\pi r_n^2} P(\cos \theta_{S_n}) \quad (12)$$

式中, A 为 R_x 接收孔径的面积, $P(\cos \theta_{S_n})$ 为第 n 次散射的相函数.

光子经过 S_n 点散射后能够传输 r_n 距离的概率为

$$P_{2n} = e^{-k_e r_n} \quad (13)$$

因此一个光子经过第 n 次散射后能够到达接收端接收面的概率为

$$P_n = W_n P_{1n} P_{2n} \quad (14)$$

式中, W_n 是光子到达 S_n 前存活概率, W_n 可求得为

$$W_n = (1 - P_{n-1}) W_{n-1} e^{-k_a |S_n - S_{n-1}|} \quad (15)$$

光子在大气中传输,其能量会因为大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射而衰减,发生散射的概率为 k_s/k_e ,为了公式的统一, W_0 设为 k_s/k_e ,由式(15)可见,散射的次数越多,光子存活的概率越小,在本文中设定光子最多经过 5 次散射到达接收端.

光子最多经过 N 次散射能到达接收端,这个事件发生的概率是 N 个子事件发生概率之和,即一个光子最多经过 N 次散射能到达接收端接收面的总概率是

$$P_N = \sum_{n=1}^N P_n \quad (16)$$

那么路径损耗 P_L 可表示为

$$P_L = \frac{P_T}{P_{R,\text{NLOS}}} = \frac{1}{P_N} \quad (17)$$

式中, P_T 是发射端发出的光功率, $P_{R,\text{NLOS}}$ 是接收端收到的光功率, P_N 是光子最多经过 N 次散射到达接收端的总概率.

1.6 误码率

误码率是评价通信质量好坏最常用的指标,非直视紫外光通信发射端采用 OOK 调制方式,接收端直接检测,忽略系统热噪声的影响,在调制信号的每个时隙,光子到达接收端的数量呈泊松分布,则系统的误码率

可表示为^[25]

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-\lambda_s) \quad (18)$$

式中, λ_s 是每一个脉冲间隔时隙内到达接收端的光子数, 可表示为^[25]

$$\lambda_s = \frac{\eta_1 \eta_2 P_T}{P_L R_{BT} E} \quad (19)$$

式中, η_1 为光电倍增管的检测效率, η_2 是滤光片的效率, P_T 是发射端发出的光功率, P_L 是路径损耗, R_{BT} 是发送端所加调制信号的码速率, $E = h\nu$ 是每个光子所携带的能量, h 是普朗克常数, $\nu = c/\lambda$, c 是光速, λ 是波长。

2 实验与仿真

2.1 实验条件

2017 年冬季西安市雾霾天气持续时间长, 污染严重等级高, 为实验验证雾霾天气对紫外光通信的影响提供了有利的条件。在西安工程大学金花校区田径场进行了良好、严重雾霾和极严重雾霾 3 种不同天气条件下的户外短距离紫外光通信实验, 3 次实验的天气情况见表 1。

表 1 天气情况
Table 1 Weather conditions

Parameter	Fineweather	Severe fog and haze weather	Extremely severe fog and haze weather
Date	2017.1.11	2017.1.3	2017.1.4
Time (p.m.)	19~23	19~23	19~23
Visibility/km	10	3	2
PM2.5 Concentration/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	69	374	509
PM10 Concentration/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	71	412	610
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	2	3	3
Relative humidity/%	48	81	86
Wind speed/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1~2	2~3	2~3
Atmospheric pressure/kPa	102.7	102.4	102.4

实验中发射端采用单颗中心波长为 255 nm、全发散角为 6° 的紫外 LED(UVTOP255); 接收端采用全视场角为 80° 的光电倍增管(滨松 R7154)来接收信号。在接收端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 cm^2 , 为了扩大通信距离, 在光电倍增管前未加滤光片。实验收发装置如图 3。

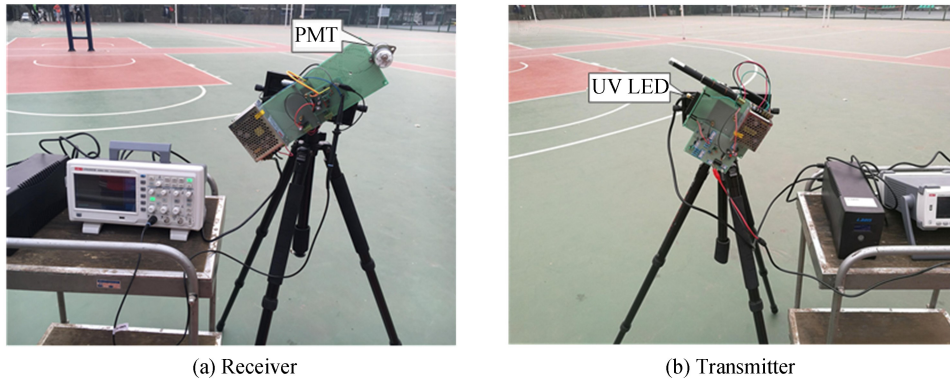


图 3 紫外光通信装置

Fig.3 Experimental device for UV communication

2.2 仿真参数设置

仿真参数设置见表 2。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

Parameter	Value
Wavelength λ	260 nm
Particle radius R	0.15 μm
The number of transmitted photons M	10^6
The number of multiple scattering N	5
Rayleigh phase function scattering parameter γ	0.017
Miephase function parameter f	0.5
Miephase function asymmetry parameter g	0.72
Beamangle ϕ_t	6°
FOV ϕ_r	80°
The off-axis angle of Tx α_t	0°
The off-axis angle of Rx α_r	0°
Transmitter's elevation angle θ_t	$[10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ]$
Receiver's elevation angle θ_r	$[10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ]$
Emission power P_T	0.6 mW
Detector active area A	1.92 cm^2
Information rate R_{BT}	10 kPs
Baseline distance r	$[10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}, 40\text{m}, \dots, 120\text{m}]$

由表 1 和表 2, 依据 1.3 节式(4)~(7)可得三种不同天气条件下的吸收和散射系数见表 3.

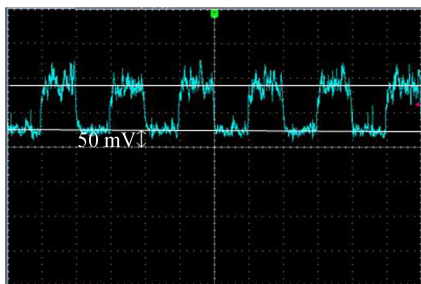
表 3 吸收和散射系数(单位: km^{-1})Table 3 Absorption and scattering coefficients (unit: km^{-1})

Weather	Absorption coefficients k_a	Scattering coefficients k_s	Rayleigh scattering coefficients k_{s_Ray}	Mie scattering coefficients k_{s_Mie}
Fine weather	1.16	1.491	0.321	1.17
Severe fog and haze weather	1.97	2.761	0.321	2.44
Extremely severe fog and haze weather	2.29	3.711	0.321	3.39

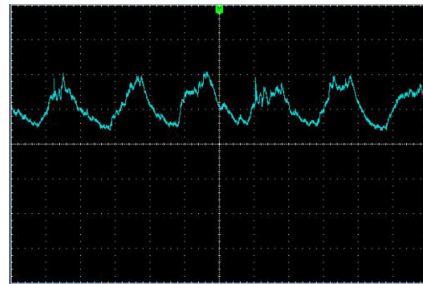
2.3 实验与仿真结果分析

2.3.1 直视紫外光通信结果分析

在严重雾霾天气下, 实验中发射端发出占空比为 50% 的方波信号, 频率分别为 10 kHz 和 100 kHz, 高电平时光功率为 0.6 mW, 直视通信时, 接收端示波器输出的部分波形如图 4, 图 4(a) 为通信距离为 90 m、发射信号频率为 10 kHz 时, 接收端的输出波形, 波形较为规整, 可以抽样判决; 图 4(b) 为通信距离为 90 m、发射信号频率为 100 kHz 时, 接收端的输出波形, 波形畸变较为严重, 但依然可以抽样判决. 对比图 4 两种不同发射频率下的输出波形, 选用 10 kHz 的输出波形进行系统路径损耗计算, 实验中未使用滤光片, 从输出波形可知背景噪声约为 50 mV, 如图 4(a), 因此在进行相关数据计算时应把接收到的方波信号的高电平电压减去总的噪声电压来去除该背景噪声得到有效电压.



(a) Transmission frequency is 10 kHz square wave



(b) Transmission frequency is 100 kHz square wave

图 4 直视紫外光通信接收端的输出波形

Fig.4 Output waveform of receiver in LOS UV communication

在直视紫外光通信时, 通信距离变化间隔为 10 m, 通信距离与路径损耗的关系如图 5. 从图 5 中可见, 在三种不同天气条件下, 随着通信距离增大, 路径损耗也增大. 在三种不同天气条件下, 极严重雾霾天气路径损耗最大, 严重雾霾天气次之, 良好天气路径损耗最小. 由表 3 可知, 随着雾霾严重程度的增大, 吸收系数增大, 通过直视传输到达接收端的光子能量减少; 随着雾霾严重程度的增大, 散射系数增大, 通过单次散射和多次散射到达接收端的光子能量增加, 但是接收端接收到的光子的总能量以经过直视传输为主, 经过单次和多次散射传输到达接收端的光子能量在接收端接收的总能量中占比很小, 因此总体来看, 随着雾霾严重程度的增大, 接收端接收到的光子总能量逐渐减小, 系统路径损耗逐渐增大.

2.3.2 非直视紫外光通信结果分析

收发端仰角分别为 10° 和 20° 时, 通信距离变化间隔为 10 m, 通信距离与路径损耗的关系如图 6, 其中实线是实验数据所得, 虚线是仿真所得. 从图 6 中可见, 在三种不同天气条件下, 仿真结果与实验结果整体趋势一致, 随着通信距离增大, 路径损耗也增大. 在三种天气下, 良好天气路径损耗最大, 严重雾霾天气次之, 极严重雾霾天气路径损耗最小, 这是因为如表 3 所示, 随着雾霾天气中 PM2.5 和 PM10 粒子浓度的增大, 大气的吸收和散射系数都增大, 但是二者相比, 散射系数增加的幅度更大, 即雾霾越严重气溶胶粒子浓度越大, 散射能力就越强, 接收端接收到的经散射传输的光子能量越多, 路径损耗越小, 这也与参考文献[12]的图 4 中部分结论相符. 收发端仰角相同时, 通信距离越大, 路径损耗越大. 在相同通信距离条件下, 对比图 6(a) 和 (b), 收发端仰角越大, 路径损耗越大. 随着收发端仰角的增加, 能正常通信的距离减小, 由图 6(a) 中的 70 m 减小到图 6(b) 中的 40 m.

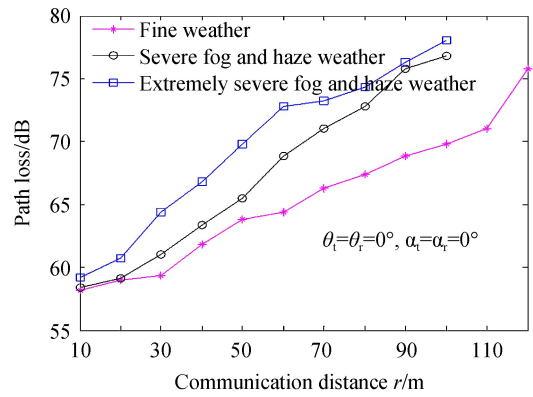


图 5 直视紫外光通信距离与路径损耗的关系

Fig.5 Relationship of LOS UV communication distance and path loss

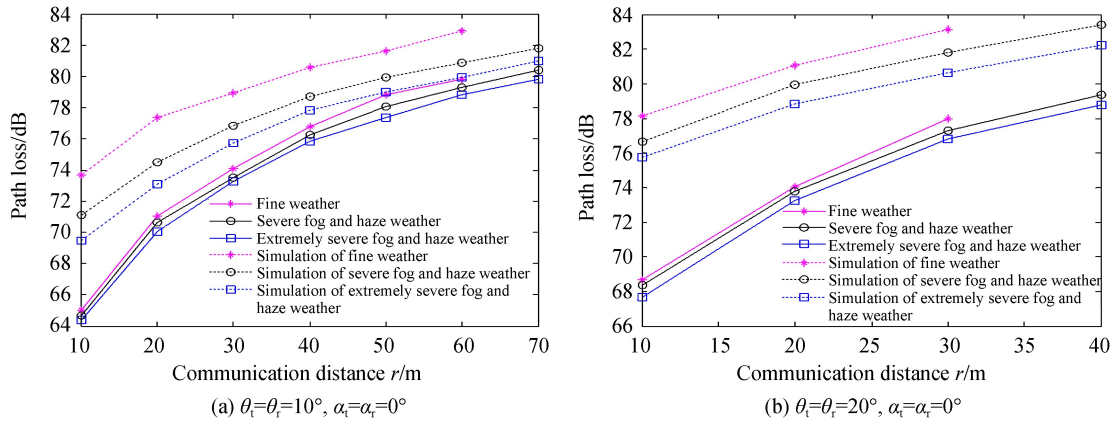


图 6 通信距离与路径损耗的关系

Fig.6 Relationship of communication distance and path loss

通信距离为 10 m 和 20 m 时, 收发端仰角变化间隔为 10° , 收发端仰角与路径损耗的关系如图 7, 其中实线是实验数据所得, 虚线是仿真所得. 由图 7 可见, 在三种不同天气条件下, 实验和仿真结果趋势相同, 随着收发端仰角的增大, 路径损耗也增大. 在图 7 中, 良好天气下路径损耗最大, 严重雾霾天气次之, 极严重雾霾天气下路径损耗最小, 与图 6 中结论相同. 通信距离相同, 收发端仰角越大, 路径损耗也越大, 主要原因是发射端发射光锥与接收端视场锥体在空中形成的有效散射体与收发端基线之间的相对距离变大, 导致光子从发射端到接收端的传输距离变大, 到达接收端的光子数便会减少, 路径损耗就进一步增大.

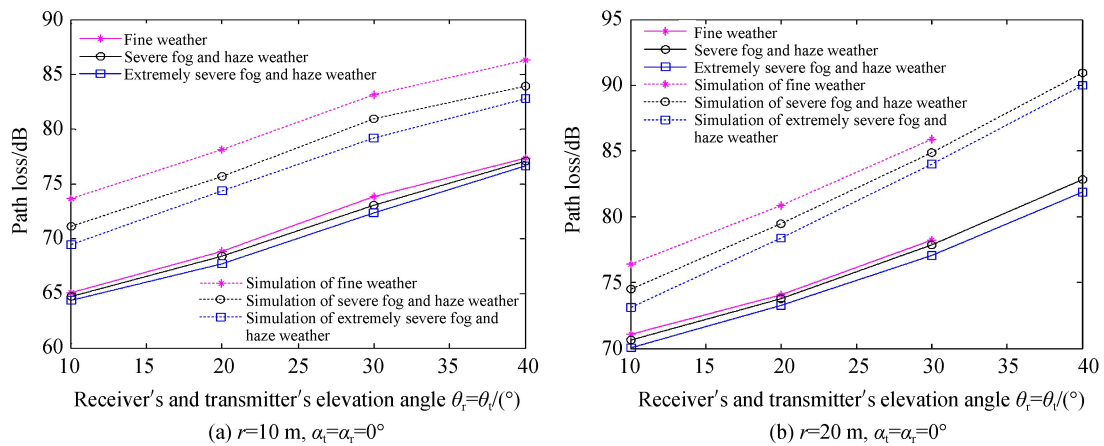


图 7 收发端仰角与路径损耗的关系

Fig.7 Relationship of elevation angle and path loss

2.4 误码率仿真结果分析

误码率是衡量通信系统质量好坏的主要参数,误码率小于 10^{-5} ,可以取得较好的通信质量,误码率为 10^{-3} 时,虽然通信还可以继续进行,但是通信质量会变得较差^[23].在仿真中参数设置为: $\eta_1=0.35, \eta_2=0.3, h=6.626 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}, c=3.0 \times 10^8\text{ m/s}$,其它参数设置见表 2.

收发端仰角为 10° 时,通信距离与误码率的关系如图 8.由图 8 可见,在三种不同天气条件下,随着通信距离的增大,误码率增大;良好天气下误码率最大,严重雾霾天气次之,极严重雾霾天气下误码率最小,这主要是因为天气质量越差,大气中气溶胶粒子浓度越大,经大气中粒子的散射,接收端收到的光子增多,路径损耗减小,由式(18)和(19)计算得到的误码率也就越小.在通信距离为 20 m 时,良好天气下的误码率接近 10^{-5} ,而严重和极严重雾霾天气下的误码率很小.通信距离从 20 m 增至 40 m ,良好天气下的误码率增加趋势较为平缓,严重和极严重雾霾天气下的误码率则急剧增加.在误码率为 10^{-5} 时,良好天气下的通信距离约为 25 m ,严重雾霾天气下约为 35 m ,极严重雾霾天气下约为 40 m ,由此可见,随着雾霾污染程度的加重,非直视紫外光通信的有效通信距离还有所增大.

通信距离为 10 m 时,收发端仰角与误码率的关系如图 9.与图 8 中结论相同,在图 9 中,良好天气下的误码率最大,通信质量最差;严重雾霾天气次之;极严重雾霾天气下误码率最小,通信质量最好.随着收发端仰角的增加,误码率随之增加.由图 9 可知,收发端仰角为 10° 时,良好天气下的误码率接近 10^{-5} ,而在有雾霾天气下的误码率却很小.收发端仰角增至 20° 时,三种天气下的误码率均快速增大,通信质量也变的较差,因此收发端仰角设置在 20° 以下时,系统误码率较小,通信质量较好.

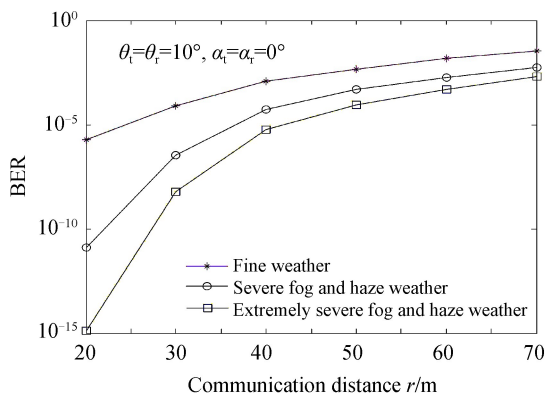


图 8 通信距离与误码率的关系

Fig.8 Relationship of communication distance and bit error rate

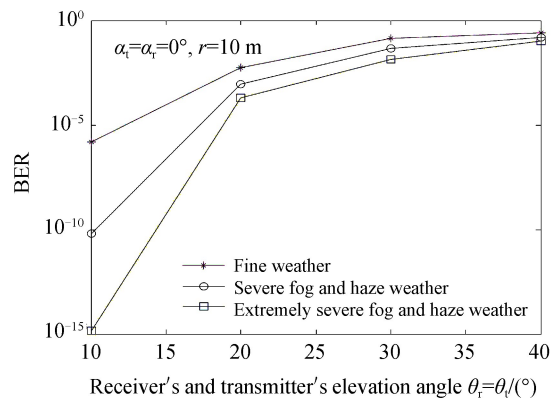


图 9 收发端仰角与误码率的关系

Fig.9 Relationship of elevation angle and bit error rate

3 结论

本文基于米散射和瑞利散射理论,利用蒙特卡洛方法模拟了光子传输的全过程,仿真分析了不同天气条件下,系统的路径损耗和误码率分别与通信距离和收发端仰角之间的关系,开展了短距离(几百米数量级)户外紫外光通信实验,仿真结果和实验结果相吻合.研究表明:1)在短距离通信条件下,随着大气气溶胶粒子浓度的增加,大气吸收系数和散射系数都有所增加,但散射系数比吸收系数增加的更多,大气信道对紫外光的散射作用也有所增强.2)在短距离通信条件下,直视通信时,良好天气下的路径损耗最小,严重雾霾天气次之,极严重雾霾天气下的路径损耗最大;非直视通信时,极严重雾霾天气下系统的路径损耗最小,误码率最小,通信质量最好,严重雾霾次之,良好天气下系统的路径损耗最大,误码率也最大,通信质量最差.下一步工作中将研究较远通信距离条件下,不同天气情况对紫外光通信的影响.

参考文献

- [1] JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YANG Jian-kun, *et al.* Monte carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in non-line-of-sight ultraviolet communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955-960.
贾红辉, 常胜利, 杨建坤, 等. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 955-960.
- [2] WANG Lei-jie, XU Zheng-yuan, BRIAN M. Non-line-of-sight ultraviolet link loss in noncoplanar geometry[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1263-1265.
- [3] SONG Peng, SONG Fei, LI Yun-hong, *et al.* Inter-link multi-user interference in non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0906001.
宋鹏, 宋菲, 李云红, 等. 非直视紫外光通信组网多用户干扰问题[J]. 光子学报, 2016, **45**(9): 0906001.
- [4] XU Zheng-yuan, BRIAN M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, **46**(5): 67-73.
- [5] SONG Xiao-mei, SONG Fei, SONG Peng, *et al.* Routing protocol of ultraviolet space division multiplexing Ad Hoc network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(10): 1006005.
宋晓梅, 宋菲, 宋鹏, 等. 紫外光空分复用自组织网络路由协议[J]. 中国激光, 2017, **44**(10): 1006005.
- [6] DING Ying, TONG Shou-feng, DONG Ke-yan, *et al.* Study and simulation of atmospheric UV communication performance with vertical transmitter-receiver[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1851-1856.
丁莹, 佟首峰, 董科研, 等. 大气信道对垂直收发模式紫外光散射通信性能影响的仿真[J]. 光子学报, 2010, **39**(10): 1851-1856.
- [7] ZHAO Tai-fei, LI Qiong, WANG Yi-dan, *et al.* Fast channel allocation method in wireless ultraviolet network based on particle swarm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0106002.
赵太飞, 李琼, 王一丹, 等. 基于粒子群的无线紫外光网络快速信道分配方法[J]. 光学学报, 2014, **34**(1): 0106002.
- [8] YUAN Ren-zhi, MA Jian-she. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. *China Communications*, 2016, **13**(6): 63-75.
- [9] LI Chun-yan, GONG Jia-min, TANG Qi, *et al.* Study on attenuation characteristics of NLOS ultraviolet communication system in haze [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(12): 164-171.
李春艳, 巩稼民, 汤琦, 等. 非视距紫外光通信系统中霾衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(12): 164-171.
- [10] GUO Li, LIU Kun-lun, MENG De-dan, *et al.* Simulation and experimental research on the Alamouti code for ultraviolet communication[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(1): 015101.
- [11] SONG Peng, KE Xi-zheng, XIONG Yang-yu, *et al.* Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(11): 1106004.
宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. 光学学报, 2016, **36**(11): 1106004.
- [12] XU Chang-ming, ZHANG Hong-ming, CHENG Ju-lian. Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(18): 23259-23269.
- [13] QIANG Ruo-xin, ZHAO Shang-hong, WANG Xiang. Study on ultraviolet single scattering link model at different atmosphere height[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **34**(6): 1027-1031.
强若馨, 赵尚弘, 王翔. 不同大气高度紫外光单次散射链路模型研究[J]. 半导体光电, 2013, **34**(6): 1027-1031.
- [14] LIN Yong, XU Zhi-yong, WANG Jing-yuan, *et al.* Simulation research on non-line-of-sight atmospheric propagation in fog weather[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0901001.
林勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾环境下非视距大气散射传输特性研究[J]. 光学学报, 2013, **33**(9): 0901001.
- [15] SONG Peng, WANG Jian-yu, SONG Xiao-mei, *et al.* Effects of haze and fog on ultraviolet communication performance [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, **40**(10): 37-39.
宋鹏, 王建余, 宋晓梅, 等. 雾霾对紫外光通信性能的影响[J]. 光通信技术, 2016, **40**(10): 37-39.

- [16] HOU Qian, LI Xiao-yi, HOU Zhi-hao, *et al.* Effects of different weathers on UV-NOLS propagation [J]. *Communication Countermeasures*, 2011(3): 13-15.
侯倩, 李晓毅, 侯志昊, 等.不同天气对紫外光非视距传输的影响[J]. 通信对抗, 2011(3): 13-15.
- [17] XU Zheng-yuan. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007, **3**: 577-580.
- [18] HE Hua, KE Xi-zheng, ZHAO Tai-fei. Research of ultraviolet non-line-of-sight single scattering link model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3148-3152.
何华, 柯熙政, 赵太飞. 紫外光非视距单次散射链路模型的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3148-3152.
- [19] SONG Peng, ZHOU Xian-li, SONG Fei, *et al.* Performance analysis of UV multiple-scatter communication system with height difference[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(32): 8908-8916.
- [20] CHEN Jun-hong, YANG Xiao-li. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4): 38-39.
陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. 激光杂志, 2008, **29**(4): 38-39.
- [21] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京:科学出版社, 2011.34-39.
- [22] YUAN Ren-zhi, MA Jian-she, SU Ping, *et al.* An integral model of two-order and three-order scattering for non-line-of-sight ultraviolet communication in a narrow beam case[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, **20**(12): 2366-2369.
- [23] SONG Peng, ZHOU Xian-li, SONG Fei, *et al.* Riemann sum method for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry[J]. *Optics Communications*, 2017, **405**: 400-405.
- [24] XU Zheng-yuan, DING Hai-peng, BRIAN M, *et al.* Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16): 1860-1862.
- [25] SONG Peng, KE Xi-zheng, SONG Fei, *et al.* Multi-user interference in a non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. *Iet Communications*, 2016, **10**(13): 1640-1645.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China-CAAC Civil Aviation Joint Research Fund(No.U1433110), Shaanxi Province Key Laboratory of Complex Systems Control and Intelligent Information Processing(Xi'an University of Technology) Open Project Fund(No.2016CP05), Shaanxi Provincial Science and Technology Department of Industrial Science and Technology Research Project(No.2016GY-101) and Science and Technology Department of Shaanxi Province Natural Science Research Project(No.2016JZ026)