

雾天环境下 SIMO NLOS 紫外光通信系统性能研究

马愈昭^{1,2*}, 程飞帆², 贾惠婷², 熊兴隆^{1,2}

¹天津市智能信号与图像处理实验室, 天津 300300;

²中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 为了研究非视距(NLOS)紫外光通信在雾天环境下的通信性能,针对常见的雾天衰减模型不适用于紫外光大气信道衰减的问题,提出一种新的衰减模型,针对多次散射传输模型计算复杂的问题,提出一种非对称因子的简化计算方法,并使用分集接收技术建立单发多收(SIMO)紫外光通信系统。利用 Mie 散射理论建立雾天紫外光衰减模型,计算两种雾型在不同浓度下的紫外光衰减参量;提出关于雾滴粒径的非对称因子的简化计算方法;使用等增益合并技术将分集接收的信号合并。采用 Monte Carlo 法分析 SIMO 紫外光通信系统性能,并与单发单收(SISO)紫外光通信系统作对比。结果表明,分集接收能有效改善雾天的紫外光通信性能:在厚、中、薄三种雾天中,SIMO 紫外光通信系统的最远通信距离比 SISO 通信系统分别大约 5, 10, 10 m; SISO 紫外光通信系统误码率为 10^{-3} 时, SIMO 通信系统误码率可降低到约 10^{-5} 。

关键词 光通信; 分集接收; 蒙特卡罗法; 路径损耗; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106007

Performance of SIMO NLOS UV Communication System in a Foggy Environment

Ma Yuzhao^{1,2*}, Cheng Feifan², Jia Huiting², Xiong Xinglong^{1,2}

¹Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Tianjin 300300, China;

²College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract To study the communication performance of non-line-of-sight (NLOS) ultraviolet (UV) communication in foggy environments, we propose a new attenuation model and a simplified calculation method of asymmetric factors. These solve the problems that the common fog attenuation model is not suitable for ultraviolet atmospheric channel attenuation and the calculation of multiple scattering transmission model is complex. A single-input-multiple-output (SIMO) ultraviolet communication system is established using the diversity receiving technology. First, a UV attenuation model is developed based on the Mie scattering theory to calculate the UV attenuation parameters of two fog types at different concentrations. Second, the asymmetric factor of a droplet size is established to simplify the calculation. Finally, the equal-gain combining technique is used to combine the diversity received signals. The performance of the SIMO UV communication system is analyzed by the Monte Carlo method and compared with that of the SISO UV communication system. The results show that diversity

收稿日期: 2020-10-21; 修回日期: 2020-11-17; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1833111)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(3122019058)

*E-mail: yzma@cauc.edu.cn

reception can effectively improve the performance of ultraviolet communication on foggy days: on thick, medium and thin fog days, and the maximum communication distance of the SIMO communication system is about 5, 10, and 10 m longer than that of a SISO communication system, respectively. When the bit error rate of the SISO ultraviolet communication system is 10^{-3} , the bit error rate of the SIMO communication system is reduced to about 10^{-5} .

Key words optical communications; diversity reception; Monte Carlo method; path loss; bit error rate

OCIS codes 010.1310; 260.7190; 060.2605; 290.4020

1 引言

紫外光是波长在 10~400 nm 之间的电磁辐射。由于大气平流层中的 O_3 对波段在 200~280 nm 下的紫外光具有强烈的吸收作用,使得该波段的紫外辐射在近地大气中几乎不存在,太阳背景噪声低于 10^{-13} W/m²,故该波段常被称为“日盲区”^[1]。大气中的气体分子以及气溶胶粒子使得紫外光在大气中传输时出现散射现象,这种散射现象使得紫外光通信系统的非视距(NLOS)传输成为可能。在无法安装铺设光纤的环境中,可以在光纤与光纤接口处采用非视距通信。非视距紫外光通信通常用于军事保密通信,或用作重大灾难通信快速恢复手段。

雾天较晴朗天气下大气中的气溶胶粒子浓度偏高,存在严重的散射和消光效应,且不同能见度下不同雾型的粒子尺度谱分布对紫外光的衰减影响不同,因此对紫外光在雾天中的传输特性进行分析具有十分重要的意义。在光传输衰减方面,Esmail 等^[2-3]分析了不同天气下的光衰减特性,但这些研究都是基于特定波段的经验衰减公式,对紫外波段实际雾天的衰减特性不再适用。在紫外光通信方面,Garg 等^[4-5]从中继技术、移动场景等方面对紫外光通信系统做了研究。巩稼民等^[6]分析了单次散射信道下不同散射相函数对紫外光传输的影响,但由于雾天粒子浓度高、传输距离近,多次散射现象不容忽视。靳永超等^[7-9]从调制度、天气条件和超奈奎斯特传输技术等方面对光通信系统的误码率进行了研究,但都没有从分集接收方面分析误码率性能。在单发多收(SIMO)光通信系统方面,范成等^[10]将分集接收技术引入到紫外光系统中,建立了 SIMO 紫外光通信系统,并进行了理论分析。王冉冉等^[11]研究了 M 分布大气湍流、瞄准误差联合效应下 SIMO 光通信系统的误码率性能。陈泉润等^[12]研究了多卫星网络中采用可见光通信的中短距离星间通信的可行性,构建了基于星间链路的 SIMO 可见光系统,评估了不同分集接收技术

对链路性能的影响。虽然上述几种研究都是基于不同信道环境对 SIMO 通信系统进行的影响分析,但缺少对雾环境下衰减信道的 SIMO 紫外光通信系统的分析。

综上,针对常见雾天衰减模型不适用于紫外光大气信道衰减以及多次散射传输仿真模型计算复杂的问题,本文结合雾滴尺度谱分布,依据 Mie 散射理论,建立新的紫外光衰减经验模型,并分析平流雾与辐射雾在不同能见度下的紫外光衰减特性;然后根据雾滴粒径拟合非对称因子的简化函数式,代替 Monte Carlo 光子多次散射模型中 Mie 理论的复杂计算式;使用 Monte Carlo 多次散射仿真模型,仿真分析平流雾与辐射雾两种雾天情况下单发单收(SISO)紫外光通信系统与 SIMO 紫外光通信系统在三种能见度下的通信性能。

2 雾天的紫外光衰减

在非视距紫外光通信系统的性能分析过程中,光信号在大气信道中的衰减对通信性能有重要的影响。而如何精确又简便地分析紫外光衰减是关键。常用的经验衰减模型由于入射光波长和能见度的适用范围不符合雾天紫外光通信要求,故需要一个适用于紫外光的衰减模型。本文通过雾滴粒子的尺度谱分布确定雾滴粒子半径,并基于 Mie 散射理论提出紫外光衰减模型,研究紫外光衰减参量。

2.1 雾滴粒子的尺度谱分布

雾分为常出现在海边的平流雾和常出现在内陆的辐射雾,不同雾型、不同能见度下雾滴的尺度谱分布不同,会造成不同的紫外光衰减。对于 Gamma 分布的雾滴尺度谱分布模型表达式为^[13]

$$n(r) = ar^{-\alpha} \exp(-br^{\beta}), \quad (1)$$

式中: $n(r)$ 为雾滴尺度谱分布,是半径为 r 的雾滴在单位体积、单位半径间隔内的粒子数; a 、 b 、 α 、 β 为谱分布的参数。基于 Gamma 谱分布模型,结合能见度与平流雾、辐射雾的经验关系,可以得到平流雾

与辐射雾的雾滴尺度谱分布经验公式分别为

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \cdot \exp(-0.8359 V^{0.43} r), \quad (2)$$

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \cdot \exp(-4.122 V^{0.54} r), \quad (3)$$

式中: V 为能见度, 单位为 km; r 为雾滴粒子半径, 单位为 μm ; $n(r)$ 为雾滴尺度谱分布, 单位为 $\text{m}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

在平流雾型和辐射雾型下厚雾 ($V = 0.05 \text{ km}$)、中雾 ($V = 0.20 \text{ km}$) 和薄雾 ($V = 2.00 \text{ km}$) 三种天气的雾滴粒子尺度谱分布如图 1 所示, 可知相同能见度下, 处于最高雾滴浓度下的平流雾的雾滴粒子半

径大于辐射雾的雾滴粒子半径; 平流雾的粒子浓度比辐射雾的粒子浓度低两个数量级。而能见度越低, 最高雾滴浓度下的雾滴粒子半径越大, 且随着能见度的降低, 雾滴粒子的最高浓度逐渐降低。其中: 厚雾时平流型雾滴粒子半径集中在 $3.5 \sim 19.0 \mu\text{m}$ 之间, 辐射型雾滴粒子半径集中在 $1.2 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 之间; 中雾时平流型雾滴粒子半径集中在 $2.0 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 之间, 辐射型雾滴粒子半径集中在 $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间; 薄雾时平流型雾滴粒子半径集中在 $0.6 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 之间, 辐射型雾滴粒子半径集中在 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间。

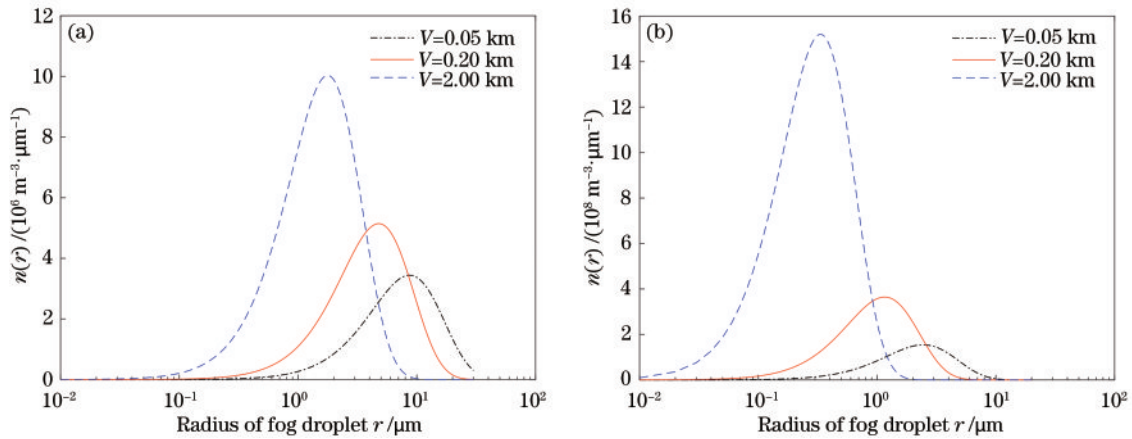


图 1 能见度分别为 0.05, 0.20, 2.00 km 的平流雾与辐射雾谱分布。(a) 平流雾; (b) 辐射雾

Fig. 1 Spectral distribution of advection fog and radiation fog with visibility of 0.05, 0.20 and 2.00 km. (a) Advection fog; (b) radiation fog

2.2 雾的紫外光衰减模型的建立

常用的经验模型如 Kim 模型和 Nabousi 模型等不能用于紫外光衰减研究, 且在紫外光衰减分析的过程中缺少紫外光波段的经验衰减模型。因此, 本研究基于 Mie 理论建立雾的紫外光衰减经验模型, 以精确且简便地分析紫外光衰减。

由 Mie 散射理论可知, 单位体积内所有雾滴粒子的总散射、吸收和消光截面就是散射、吸收和消光系数。所以, 雾滴粒子群的散射、吸收和衰减系数为^[13]

$$\beta_{\text{abs, sca, ext}} = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} Q_{\text{abs, sca, ext}}(m, x) n(r) \pi r^2 dr, \quad (4)$$

式中, $Q_{\text{abs, sca, ext}}(m, x)$ 为吸收、散射和消光效率因子, 可分别表示为

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \right], \quad (5)$$

$$Q_{\text{sca}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)], \quad (6)$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}}, \quad (7)$$

其中, m 为雾滴粒子的复折射率, x 为雾滴粒子的尺度参数 ($x = \frac{2\pi r}{\lambda}$, λ 为波长), a_n, b_n 为 Mie 因子。由文献[14]可知, 雾滴粒子为水溶性粒子, 在 250 nm 波长下的复折射率为 $m = 1.362 - 3.35 \times 10^{-8}i$ 。

能见度影响粒子尺度谱分布, 进而决定衰减系数, 把能见度作为经验衰减模型的自变量可以更直观地表示光衰减。基于 Mie 散射理论的精确衰减计算, 利用(4)式得到平流雾型和辐射雾型天气下光衰减系数随能见度的两条变化曲线, 并对曲线进行拟合。通过拟合建立 250 nm 紫外光波长下能见度在 2 km 内新的经验衰减模型, 其衰减系数可表示为

$$\alpha_{\text{adv}} = 4.08 \times V^{-0.9943} + 0.06565, \quad (8)$$

$$\alpha_{\text{rad}} = 4.321 \times V^{-0.9864} + 0.3749. \quad (9)$$

由新的经验衰减模型可以得出不同能见度下不同雾型在 250 nm 波长下的衰减系数, 如表 1 所示。

表 1 四种能见度下平流雾与辐射雾的衰减系数

Table 1 Attenuation coefficients of advection fog and radiation fog under four kinds of visibility

Visibility /km	0.05	0.20	1.00	2.00
Attenuation coefficient α for advection fog /km ⁻¹	80.2841	20.2794	4.1456	2.1137
Attenuation coefficient α for radiation fog /km ⁻¹	83.3447	21.5121	4.6959	2.5559

3 多次散射传输仿真模型简化计算

为了研究接收端接收到的光信号,基于 Monte Carlo 法构建多次散射传输仿真模型,模拟光子在大气信道中的传输。在传输仿真模型中,光子的散射角由散射相函数决定。紫外光在大气信道中传输时,会同时发生 Rayleigh 散射和 Mie 散射,文中使用的散射相函数是 Rayleigh 散射相函数和 Mie 散射相

函数的加权和,即

$$P(\cos \theta) = \frac{k_s^{\text{Ray}}}{k_s} P^{\text{Ray}}(\cos \theta) + \frac{k_s^{\text{Mie}}}{k_s} P^{\text{HG}}(\cos \theta), \quad (10)$$

式中:散射系数 $k_s = k_s^{\text{Ray}} + k_s^{\text{Mie}}$, k_s^{Ray} 为瑞利散射系数, k_s^{Mie} 为 Mie 散射系数; $P^{\text{Ray}}(\cos \theta)$ 为光子与大气分子碰撞发生的瑞利散射相函数, $P^{\text{HG}}(\cos \theta)$ 为光子与雾滴粒子碰撞发生 Mie 散射的 HG 散射相函数,具体表达式分别为

$$P^{\text{Ray}}(\cos \theta) = \frac{3[1 + 3\gamma_R + (1 - \gamma_R)\cos^2 \theta]}{16\pi(1 + 2\gamma_R)}, \quad (11)$$

$$P^{\text{HG}}(\cos \theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\cos \theta)^{3/2}} + f \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2(1 + g^2)^{3/2}} \right], \quad (12)$$

其中, θ 为散射角, γ_R, g, f 为大气模型参数。非对称因子 g 的表达式为

$$g = \frac{1}{Q_{\text{sca}}} \cdot \frac{4}{x^2} \left[\sum_n \frac{n(n+2)}{n+1} \text{Re}(a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*) + \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \text{Re}(a_n b_n^*) \right]. \quad (13)$$

为了降低多次散射传输仿真模型的复杂度,文中对非对称因子的复杂计算进行简化。简化计算的思路为:在 250 nm 紫外光的条件下,采集雾滴粒子半径与对应 Q_{sca} 中求和部分的 $\sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)]$ 和 g 中求和部分的

$\sum_n \frac{n(n+2)}{n+1} \text{Re}(a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*) + \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \text{Re}(a_n b_n^*)$ 的数据点,根据这两组数据点,拟合关于雾滴粒径的简单计算函数,即

$$\sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)] = 7.115 \times 10^{-4} \cdot r^{1.99}, \quad (14)$$

$$\sum_n \frac{n(n+2)}{n+1} \text{Re}(a_n a_{n+1}^* + b_n b_{n+1}^*) + \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \text{Re}(a_n b_n^*) = 2.946 \times 10^{-4} \cdot r^{1.994}. \quad (15)$$

拟合的边界条件为 250 nm 波长下粒子半径在 0.1~35 μm 之间的水溶性气溶胶粒子。图 2 为原求和值与拟合值的对比,拟合出的式子与原式非常贴合,拟合效果良好。将拟合得到的 (14) 式、(15) 式代入到 (13) 式中可得一个形式简单的关于粒子半径的函数。

在不同能见度不同类型的雾天中,雾滴粒子的粒径不同,对散射光的空间分布也会有不同的影响。本节根据雾滴粒径拟合出的非对称因子简化

函数可以更直观更简便地反映粒径对散射相函数参数的影响。在 250 nm 的波长下,得到不同的非对称因子如表 2 所示。

4 SIMO 紫外光通信信道模型

在非视距紫外光通信中,光子与雾滴粒子散射碰撞是实现非视距通信的基础,但同样会造成光信号衰落,造成通信系统性能变差。在大气信道中传输造成的光衰减不可避免,但是使用分集接收技术

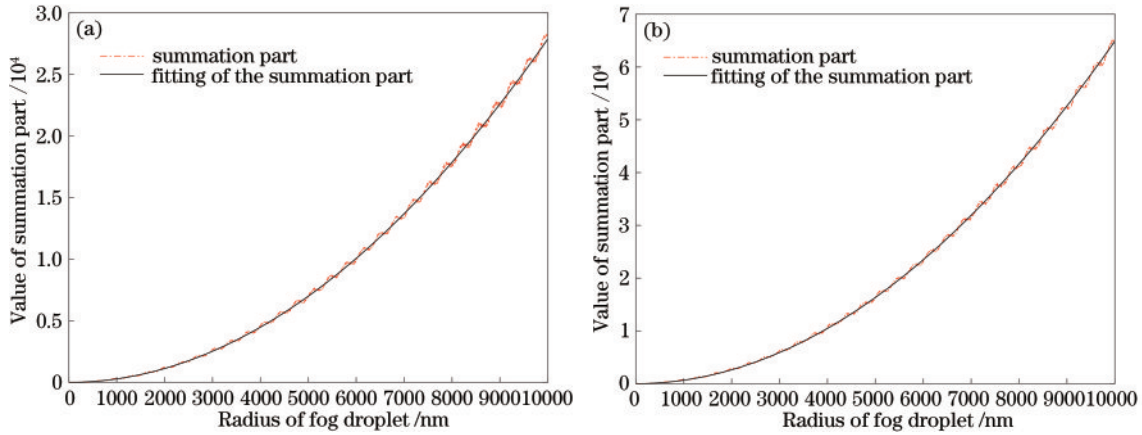


图 2 求和部分精确值与拟合值对比。(a)对应 Q_{sca} 中求和部分;(b) 对应 g 中求和部分

Fig. 2 Comparison of exact value and fitting value of summation part. (a) Summation in Q_{sca} ; (b) summation in g

表 2 不同天气条件下的非对称因子

Table 2 Asymmetric factors under different weather conditions

Visibility /km	g	
	Advection fog	Radiation fog
0.05	0.8353	0.8311
0.20	0.8334	0.8286
2.00	0.8302	0.8245

处理接收光信号可以提升通信性能。因此,本文在使用传统的 SISO 紫外光通信系统的基础上,使用分集接收技术建立 SIMO 紫外光通信系统以提升通信性能。

4.1 SISO 紫外光通信系统

非视距 SISO 紫外光通信系统模型如图 3 所示,图中 TX 为发射端,RX 为接收端。

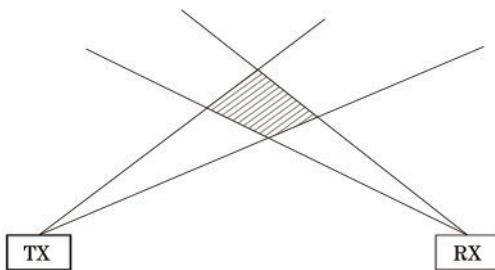


图 3 NLOS SISO 光通信系统模型

Fig. 3 NLOS SISO optical communication system model

光子在雾天的大气信道中传输受散射、吸收、消光等系数的影响,决定了在接收端接收到的光子数。文献[15]指出,使用光子计数器记录的光子数服从泊松分布。由于雾滴粒子的复折射率虚部很小,吸收系数约为零,故一个光子基于 Monte Carlo 法在雾信道下经过 N 次散射到达接收端的检测概率为各阶次散射到达接收端的检测概率之和,即

$P_N = \sum_{n=1}^N P_n$ 。由光子的检测概率可以得到光通信信

道的路径损耗为

$$P_L = \frac{1}{P_N} \quad (16)$$

考虑到中等背景噪声和大气中的路径损耗,SISO 紫外光通信系统中单接收机单发射机构成单大气信道,经单大气信道接收到的光信号信噪比为 R_{SN} ,系统的误码率是关于 R_{SN} 的 Q 函数(互补累计分布函数),表达式为

$$R_{BE-S} = Q(\sqrt{R_{SN}}), \quad (17)$$

式中,不经分集接收的单信道下的光信号信噪比的表达式为

$$R_{SN-S} = \frac{\gamma_d}{\gamma_n}, \quad (18)$$

其中, γ_d 为每个脉冲间隔检测到的光子数, γ_n 为每个脉冲间隔的噪声光子数。在 $200 \mu s$ 的脉冲宽度下,每个脉冲的噪声光子计数为 0.95,相当于 4.75 kHz 的噪声计数率^[16]。每个脉冲间隔检测到的光子数 γ_d 的表达式为

$$\gamma_d = \frac{\eta_1 \eta_2 P_t \lambda}{hc R_{BT} P_L}, \quad (19)$$

式中: η_1 、 η_2 为光电倍增管的检测效率和滤光片的效率; P_t 为发射端的光功率; λ 为光波长; h 为普朗克常量; c 为光速; R_{BT} 为码速率。

4.2 SIMO 紫外光通信系统

为了提高紫外光通信系统信噪比,降低误码率,引入空间分集技术实现多路信号独立传输,以提高接收信号的正确判决率。本文提出的 SIMO 光通信系统在接收端使用双接收机,形成两个独

立传输信道,在接收端使用等增益合并技术将接收到的两路不相关信号合并,以提高信噪比,减小误码率。SIMO 紫外光通信系统模型如图 4 所示。

由于光子到达数服从泊松分布,探测到的信号幅度也同样满足泊松分布。各支路信号彼此不相

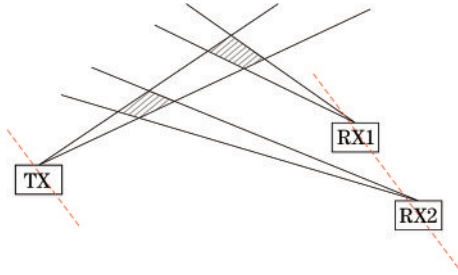


图 4 NLOS SIMO 光通信系统模型

关,需要满足的无相关条件为: $\sqrt{\lambda D} < d < \delta D$,其中, λ 为入射光波长, D 为发射机与接收机之间的距离, δ 为光束发散角。将两路独立的信号进行等效增益合并之后的信号幅度为

$$r_{eq} = \sum_{i=1}^{N=2} r_i, \quad (20)$$

式中, r_i 为第 i 条支路的信号幅度, $N=2$ 为系统的支路数。则经过分集接收的 SIMO 光通信系统的总输出信噪比为

$$R_{SN-M} = \frac{1}{N_0 N} \left(\sum_{i=1}^N r_i^2 + \sum_{i,j=1}^N r_i r_j \right), \quad (21)$$

式中 N_0 为每个分支的噪声。因为探测到的信号幅度满足泊松分布,所以有 $r_i^2 = \gamma^2 + \gamma, r_i \cdot r_j = \gamma^2$,其中光子到达率 $\gamma = \gamma_d + \gamma_n$ 。故 (21) 式可化简为^[17]

$$R_{SN-M} = \frac{1}{N_0 N} \left[N(\gamma^2 + \gamma) + N(N-1)\gamma^2 \right] = \frac{\gamma + \gamma^2}{N_0} \left[1 + (N-1) \frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma^2} \right] = R_{SN} \left(1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\gamma}} \right). \quad (22)$$

使用分集接收技术后的 SIMO 通信系统误码率为

$$R_{BE-M} = Q\left(\sqrt{R_{SN-M}}\right). \quad (23)$$

5 信道损耗和误码率仿真分析

在研究 NLOS 紫外光通信系统性能时,本研究从信道损耗和误码率两部分进行分析。在不同能见度天气下,分析 NLOS 紫外光通信 SISO 系统信道的路径损耗和误码率,进而分析了 NLOS 紫外光通信 SIMO 系统下误码率的改善以及对通信距离的扩大。单 LED 产生的辐射光功率为 0.3 mW,利用波束廓线仪测得光束发散角为 17°。接收端的光电倍增管 (PMT, MP1922) 探测窗口的直径为 1.5 cm,有效探测区域为 1.77 cm²,有效视场角 (FOV) 为 30°。根据已有研究经验,4 阶以上散射可以忽略,因此将最大散射次数设为 4。在仿真中将收发端设置在共轴面上,NLOS 紫外光通信系统仿真参数设置见表 3。

使用 Monte Carlo 法进行多次散射传输仿真,将光子初始化,由非对称因子等大气模型参数和紫外光衰减参量更新光子方向和位置,并对光子能否接收进行判断,最后由光子的检测概率计算得到路径损耗与误码率,传输仿真的具体流程如图 5 所示。根据上述仿真参数设置,结合表 1 的衰减系

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	250
Scattering times	4
Atmospheric model parameter γ_R	0.017
Atmospheric model parameter f	0.5
RX angle pair $(\alpha_r, \psi_r) /(^{\circ})$	(60,90)
FOV $\phi_r /(^{\circ})$	30
Receiver aperture area A / cm^2	1.77
TX angle pair $(\alpha_t, \psi_t) /(^{\circ})$	(60,270)
Transmitter angle of view $\phi_t /(^{\circ})$	17
Emission power P_t / mW	0.3
Information rate $R_{BT} / (\text{kbit} \cdot \text{s}^{-1})$	5

数,由(16)式仿真了发射端与接收端的距离间隔变化为 10 m 时,平流雾与辐射雾在不同能见度下的路径损耗。从图 6 可知:随着通信距离的增加,路径损耗逐渐增大;在较短通信距离内,路径损耗与能见度成正比,而在较长通信距离内,路径损耗与能见度成反比。如在图 6(a)平流雾型 30 m 和图 6(b)辐射雾型 20 m 的通信距离范围内,能见度为 0.20 km 下的路径损耗小于能见度为 2.00 km 下

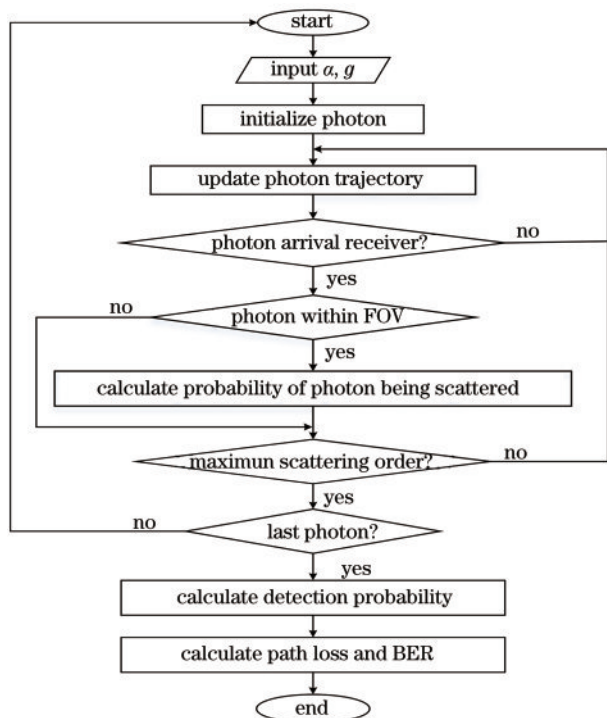


图 5 传输仿真流程图

Fig. 5 Transmission simulation flow chart

的路径损耗,当通信距离增大后,能见度为 0.20 km

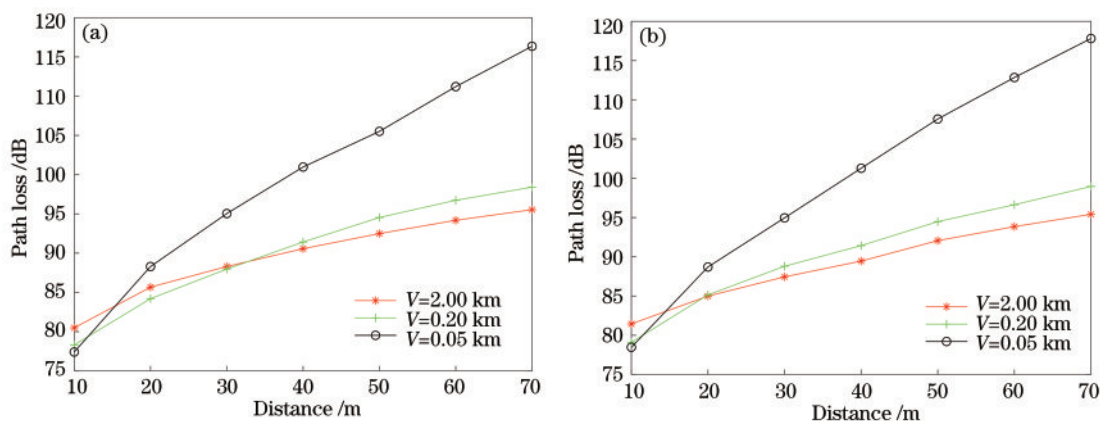


图 6 不同雾型下的路径损耗。(a)平流雾;(b)辐射雾

Fig. 6 Path loss under different fog patterns. (a) Advection fog; (b) radiation fog

在描述紫外光通信系统的性能时,除了路径损耗外,误码率也可以作为衡量通信质量的重要指标之一。通常,误码率小于 10^{-5} 时通信质量较好;误码率为 10^{-3} 时,勉强能进行通信,但通信质量较差。由 (18) 式、(19) 式可知,路径损耗影响了误码率,图 7 给出不同能见度不同雾型下的误码率与距离关系图。仿真时设置 PMT 的检测效率 $\eta_1 = 0.3$, 滤光片的滤光效率 $\eta_2 = 0.35$ 。由于在低能见度的雾天气下,通信质量相较于晴朗天气比较差,为了改善

下的路径损耗则大于能见度为 2.00 km 下的路径损耗。图 6(a)平流雾型和图 6(b)辐射雾型在不同通信距离范围内,三种能见度 $V = 2.00$ km、 $V = 0.20$ km 与 $V = 0.05$ km 下的路径损耗都符合这种变化规律。

能见度低的天气在短距离内路径损耗反而低于能见度高的路径损耗,出现这种现象的原因在于:短距离范围内雾滴粒子的浓度较高,增大了光子与雾滴粒子碰撞的概率,并保证光子被散射后的传输距离不会太远,使得接收机接收到的光信号较强,路径损耗偏低。而在较长的通信距离内,光子与雾滴粒子多次碰撞并被散射后的传输运动距离过短,使得光子侧向散射进入接收机的概率减小,接收到的光信号减弱,导致路径损耗偏高。对比图 6(a)和图 6(b)两种雾型天气,平流雾型下路径损耗与能见度成正比的通信距离较长,因此在粒子浓度较高时的平流雾天气中短距离通信的光通信系统传输性能更好。总体来看,平流雾下的路径损耗略低于辐射雾下的路径损耗,符合文中 2.2 节两种雾型的紫外光衰减系数的大小特征,这表明平流雾下的光通信系统传输性能优于辐射雾天气。

雾天气下的通信质量,使用了分集接收技术。

令误码率达到 10^{-3} 时的通信距离作为光通信系统的最远通信距离。由 (22) 式可以得到双信道下的信噪比与单信道下的信噪比关系,再由 (17) 式和 (23) 式得到单信道与双信道的误码率。图 7 给出距离间隔 5 m 下光通信系统的误码率。由图 7 (a)、(c)、(e)可以得到平流雾下厚、中、薄三种能见度天气 SISO 系统最远通信距离和其对应的两种系统的误码率,以及 SIMO 系统相比于 SISO 系统通信距离的增量关系,见表 4。对比图 7 (a)、(c)、(e)

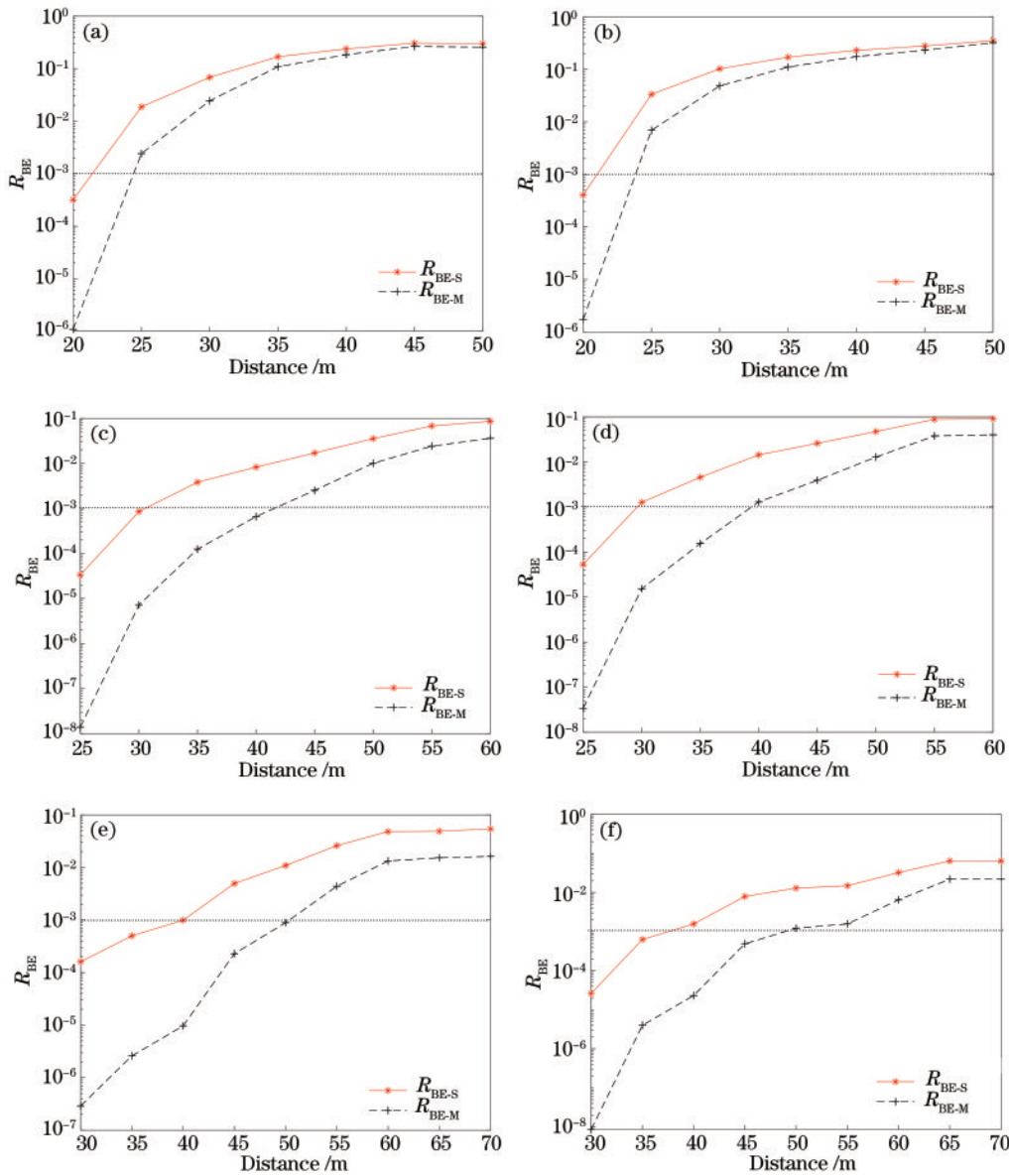


图 7 SISO 与 SIMO 紫外光通信系统的误码率。(a) 0.05 km, 平流雾; (b) 0.05 km, 辐射雾; (c) 0.20 km, 平流雾; (d) 0.20 km, 辐射雾; (e) 2.00 km, 平流雾; (f) 2.00 km, 辐射雾

Fig. 7 Bit error rate of SISO and SIMO UV communication systems. (a) 0.05 km, advection fog; (b) 0.05 km, radiation fog; (c) 0.20 km, advection fog; (d) 0.20 km, radiation fog; (e) 2.00 km, advection fog; (f) 2.00 km, radiation fog

表 4 平流雾下 SISO 与 SIMO 通信系统的误码率及通信距离

Table 4 R_{BE} and communication distance of SISO and SIMO under advection fog

V / km	0.05	0.20	2.00
Maximum distance of SISO / m	21	30	40
Distance increment of SIMO / m	5	10	10
R_{BE-S}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
R_{BE-M}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}

平流雾与图 7(b)、(d)、(f) 辐射雾天气, 可以得到辐射雾型最远通信距离较平流雾小 2~3 m, SIMO 通

信系统对通信距离增量基本一致。

6 结 论

依据紫外光经验衰减模型得到精确的光衰减参量, 并通过 Monte Carlo 法构建多次散射传输仿真简化模型, 模拟得到 SIMO 紫外光通信系统下的通信性能。结果表明: 雾天环境中, 在较短的通信距离内, 能见度越低, 雾滴粒子浓度越高, 路径损耗越小; 而在较长的通信距离内, 能见度越高, 雾滴粒子浓度越低, 路径损耗越小。SIMO 紫外光通信系统

相比于 SISO 系统,最远通信距离下的误码率降低了两个数量级;在厚、中、薄三种能见度的天气中对最远通信距离均有扩大,但扩大距离不同。相同能见度中,平流雾型的海上紫外光通信系统性能优于辐射雾型的陆上紫外光通信系统。本研究为雾天环境下的紫外光通信提供了参考,下一步将搭建实验平台,对文中的仿真结果作进一步的验证。

参 考 文 献

- [1] Ke X Z, Deng L J. Wireless optical communication[M]. Beijing: Science Press, 2016: 153-157.
柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 153-157.
- [2] Esmail M A, Fathallah H, Alouini M S, et al. Effect of dust storms on FSO communications links[C]//2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), December 16-18, 2016, Hammamet, Tunisia. New York: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [3] Ivanov H, Mustafa L, Cernic E, et al. Estimation of Mie scattering influence for the FSO channel under artificially simulated fog conditions[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10787: 107870R.
- [4] Garg K K, Singya P K, Bhatia V, et al. Performance analysis of AF relayed NLOS UV communication over turbulent channel[C]//2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), December 16-19, 2018, Indore, India. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [5] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0406001.
宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0406001.
- [6] Gong J M, Jiang X B, Li C, et al. Characteristics of ultraviolet transmission based on different scattering phase functions[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(6): 954-958.
巩稼民, 姜小波, 李晨, 等. 基于不同散射相函数的紫外光传输特性研究[J]. 半导体光电, 2015, 36(6): 954-958.
- [7] Jin Y C, Chen X B, Mao X R, et al. Influence of modulation degree on performances of visible light communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0506001.
靳永超, 陈雄斌, 毛旭瑞, 等. 调制度对可见光通信系统性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0506001.
- [8] Song P, Wan J F, Chen C, et al. Effects of fog and haze on ultraviolet communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(5): 0506004.
宋鹏, 万杰峰, 陈冲, 等. 雾霾天气对紫外光通信的影响[J]. 光子学报, 2018, 47(5): 0506004.
- [9] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [10] Fan C, Zuo Y, Wu C Y, et al. Research on diversity reception in ultraviolet communication system[J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(12): 44-46.
范成, 左勇, 吴朝烨, 等. 紫外光通信系统中分集接收的研究[J]. 光通信技术, 2013, 37(12): 44-46.
- [11] Wang R R. Performance analysis of wireless optical communication system over M fading channels[D]. Xi'an: Xidian University of Electronic Science and Technology, 2017.
王冉冉. 基于 M 衰落信道的无线光通信系统传输性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [12] Chen Q R, Yu X, Cui W N, et al. Visible-light communication and performance analysis based on medium- and short-distance inter-satellite links[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006003.
陈泉润, 虞翔, 崔文楠, 等. 基于中短距离星间链路的可见光通信及性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006003.
- [13] Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region[J]. Applied Optics, 1973, 12(3): 555-563.
- [15] Gagliardi R M, Karp S. Optical communications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [16] Chen G, Galala F A, Xu Z Y, et al. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 15059-15068.
- [17] Han D H, Liu Y L, Zhang K, et al. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15833-15842.