

低空大气湍流对无线紫外光通信性能的影响分析

赵太飞^{1,2*}, 张海军¹, 李咪娜¹, 李晖^{1,2}¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000

摘要 无线紫外光在大气中进行非直视散射通信时,大气微粒的散射和吸收作用以及低空大气湍流的变化会对紫外光通信(UVC)性能产生强烈的影响。建立了低空大气湍流无线紫外光非直视(NLOS)单次散射通信链路模型,通过计算机仿真分析了收发端范围、折射率结构参数、指向角等不同因素下NLOS散射通信的光强分布特性、信噪比、信号衰减等系统通信性能,以及高度变化对白天和夜间UVC的影响。仿真结果表明:不同高度湍流变化下昼夜间无线UVC性能存在一定差距,水平通信、垂直通信和斜程通信时:在夜间的大气折射率结构常数相对于弱湍流情况增大一个数量级,信号能量平均衰减为原来的1/2.09、1/2.16、1/2.03;在白天的大气折射率结构常数相对于弱湍流情况增大一个数量级,信号能量平均衰减为原来的1/2.07、1/2.15、1/1.96。夜间通信受湍流的影响更大,白天的通信性能比夜间好,湍流对垂直通信的影响较大。

关键词 光通信; 紫外光通信; 湍流信道; 大气折射率结构常数; 光强分布特性; 信号衰减

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2406001

Influence of Low-Altitude Atmospheric Turbulence on Performance of Wireless Ultraviolet Communication

Zhao Taifei^{1,2*}, Zhang Haijun¹, Li Mina¹, Li Hui^{1,2}¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710000, Shaanxi, China

Abstract When wireless ultraviolet light is availed for non-line-of-sight scattering communication in the atmosphere, the scattering and absorption of atmospheric particles and the change in low-altitude atmospheric turbulence have a substantial impact on the performance of ultraviolet communication (UVC). This study builds a link model for wireless ultraviolet non-line-of-sight (NLOS) single-scattering communication under low-altitude atmospheric turbulence. Then, computer simulation is performed to analyze the system's communication performance, such as the light intensity distribution characteristics, signal-to-noise ratio, and signal attenuation, in NLOS scattering communication under different factors, including the ranges of the transmitter and the receiver, the refractive index structure parameters, and the pointing angle, and the effect of altitude variation on UVC during the day and at night. The simulation results reveal a gap between the performance of wireless UVC during the day and at night under turbulence changes at different heights. In the cases of horizontal communication, vertical communication, and oblique communication, the atmospheric refractive index structure constant at night increases by an order of magnitude compared with that under the weak turbulence condition, and the signal energy attenuates to 1/2.09, 1/2.16, and 1/2.03 of the original values, respectively, on average. The atmospheric refractive index structure constant during the day increases by an order of magnitude compared with that under the weak turbulence condition, and the signal energy attenuates to 1/2.07, 1/2.15, and 1/1.96 of the original values, respectively, on average. Clearly, communication at night is more affected by turbulence, and communication performance during the day is better than that at night. Moreover, turbulence has a greater impact on vertical

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-07-15; 录用日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-044)、陕西省教育厅科研计划(17-JF024)、西安市碑林区科技计划(GX1921)、榆林市科技计划(2019-145)

通信作者: *tfz@xaut.edu.cn

communication.

Key words optical communications; ultraviolet communication; turbulent channel; atmospheric refractive index structure constant; light intensity distribution characteristics; signal attenuation

1 引言

近年来,紫外光技术在军用和民用领域的应用范围迅速扩展,同时紫外光源和日盲探测器也快速发展,但是紫外光通信(UVC)的关键技术^[1]亟待突破,紫外光非直视(NLOS)信道建模成为UVC的关键问题,它需要考虑大气条件和复杂的收发器几何配置。在紫外光散射通信过程中,大气湍流是除大气散射和吸收之外影响光波传播的主要大气过程之一,主要影响光波传播的大气过程包括散射、吸收和折射率波动。湍流引起的闪烁衰减(SA)将导致光束能量的损失,因此,研究湍流对UVC性能的影响具有十分重要的意义。

目前,国内外学者对紫外光信道建模问题进行了大量的研究,Ding等^[2]提出了一种结合散射和吸收效应的非直视(NLOS)紫外信道的湍流建模方法,建模结果可用于通信性能的研究。文献[3]对合肥地区昼夜间大气折射率结构常数 C_n^2 的分布变化进行了研究,得出结论:白天的湍流强度大于夜间,且夜间的 C_n^2 随高度的变化较大,分布较离散。文献[4]研究了湍流对NLOS紫外通信性能的影响,以及系统的几何形状对闪烁效应产生的影响,讨论了接收信号的能量分布模型,而不是平均路径损耗模型。文献[5]分析了弱湍流环境下斜程逆向调制链路的闪烁指数,结果表明:随着天顶角、传输距离和湍流强度的增大以及接收孔径的减小,湍流对光束的影响变大,光强闪烁指数增大,可通过适当减小天顶角和增大接收端天线口径来抑制闪烁,以提高系统的通信性能。接收端耦合光斑粗跟踪可有效抑制大气湍流引起的光束漂移,在下行链路建立的同时即可实现上行链路的建立^[6]。文献[7]采用实验数据和理论模型对远距离NLOS UVC信道进行了表征,考虑了探测湍流影响的测量,但是现有湍流模型的实验支持有限。近年来,研究人员对于紫外光单次散射^[8-9]通信性能的研究较多,而单光子探测^[10]作为弱光探测的主要手段,近些年发展迅速,也逐渐被应用于无线光通信系统中。文献[11]提出了一种基于有效散射体划分的UVC窄光束情况下的单散射湍流模型,该模型考虑了大气散射、吸收和湍流在不同路径上的变化,为紫外湍流信道估计提供了一种有效的方法。研究湍流对紫外光NLOS单次散射通信的影响,需要考虑高度这一因素,但是现有的研究模型仅考虑了海拔高度的影响。因此,本文考虑有效散射体与收发端水平面之间的高度差,对散射通信链路进行研究,更加准确地分析UVC性能。

UVC技术可应用于复杂电磁干扰下的军事对抗场景中,如无人机蜂群博弈对抗、无人机集群编队作战等具有隐秘性要求的特殊通信场合^[12],无线UVC在海陆空方面的军事应用具备一定的潜在价值^[13],包括无人值守的地面传感器网络、无人机空中加油、飞机起降援助等。文献[14]研究了NLOS UVC的安全问题,在存在有源或无源窃听者的情况下,以及在预先确定的大气湍流条件下,UVC可以进行安全传输。对于无人机机载无线UVC系统,当紫外光协助无人机隐秘通信时,受到规划任务和作业环境的影响,昼夜大气环境的差别可能会产生不同的影响。针对这一问题,本文建立的模型引入了散射体到水平收发端之间的垂直距离,重新建立紫外光NLOS单次散射链路模型,探讨了昼夜间湍流对UVC性能的影响。通过研究分析,所建模型能够减小系统误差。

2 NLOS单次散射几何通信链路模型

2.1 NLOS单次散射通信链路模型

在大气湍流理论中,信号强度的分布模型是建立在直视通信模型的基础上。将紫外光NLOS通信链路模型分解为两条紫外光直视通信链路 L_1 和 L_2 来分析散射通信的信号强度分布,从发射端T到收发端R为链路 L_1 ,从V到接收端R为链路 L_2 。低空大气湍流无线紫外光NLOS单次散射通信链路模型如图1所示,其中: $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$ 为散射角, θ_1 和 ϕ_1 分别为发射端的发射仰角和光束发散角, θ_2 与 ϕ_2 分别为接收端的接收仰角和接收视场角, h_1 为紫外光有效散射体V距离收发端水平面的垂直高度, r 为收发端之间的距离, r_1 和 r_2 分别为发射端与接收端到V之间的距离, $r_1 = r \sin \theta_2 / \sin \theta_s$, $r_2 = r \sin \theta_1 / \sin \theta_s$ 。

对于直视链路 L_1 和 L_2 ,V处信号强度分布概率密

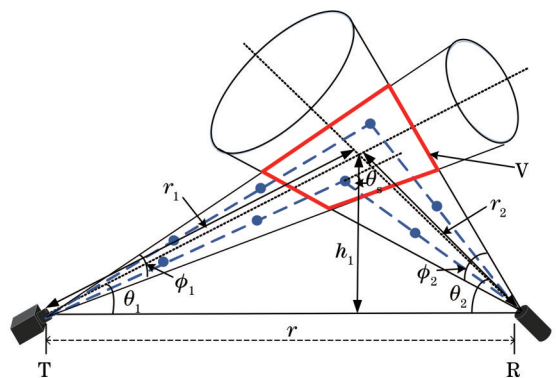


图1 低空大气湍流无线NLOS单次散射通信链路模型
Fig. 1 Single-scattering communication link model of low atmospheric turbulence wireless NLOS

度函数(PDF)可用已有湍流理论模型 $f_0(I/\langle I \rangle)$ 表示,其中, $f_0(\cdot)$ 由不同湍流强度而定, I 为直视链路接收信号强度, $\langle \cdot \rangle$ 代表系统平均。弱湍流情况下紫外光信号强度分布服从对数正态分布模型,其PDF^[2]可以表示为

$$f_0\left(\frac{I}{\langle I \rangle}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_I I / \langle I \rangle} \exp\left[-\left(\ln \frac{I}{\langle I \rangle} + \frac{1}{2} \sigma_I^2\right)^2 / (2\sigma_I^2)\right], \quad (1)$$

式中: σ_I^2 为紫外光信号对数光强起伏方差。中强湍流情况下,对数正态分布模型不再适用,而是采用Gamma-Gamma分布模型,其PDF可表示为

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0, \quad (2)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数; α, β 分别为大尺度散射系数和小尺度散射系数; $K_n(\cdot)$ 为阶数为 n 的第二类修正Bessel函数。

在 L_1 路径上有 $\frac{I}{\langle I \rangle} = \frac{i_{r_1}}{i_{l_1}}$, i_{l_1} 为从T到V的平均信号强度, i_{r_1} 为在湍流影响下到达V的信号强度,令 $i_{r_1} = \langle I_1 \rangle = 1$,则 i_{r_1} 的PDF为

$$f_1(i_{r_1}) = f_0(I_1). \quad (3)$$

在 L_2 路径上到达R的平均信号强度 i_{l_2} ^[15]可表示为

$$i_{l_2} = i_{r_1} \frac{A_r \exp(-K_e r_2)}{r_2^2}, \quad (4)$$

式中: A_r 为接收孔径面积; K_e 为大气消光系数。接收端的归一化信号强度是 $i = i_{r_2}/i_{l_2}$, i_{r_2} 为湍流条件下到达R的信号强度,其PDF为

$$f_{21}(I i_{r_1}) = f_0(i_{r_2}/i_{l_2}). \quad (5)$$

因此,接收端收到的信号强度边缘分布PDF为

$$f_2(I) = \int_0^\infty f_{21}(I i_{r_1}) f_1(i_{r_1}) di_{r_1}. \quad (6)$$

2.2 不同场景的NLOS单次散射通信模型

图2表示了不同的紫外光NLOS单次散射通信场景:水平通信即收发端处于同一水平高度,收发端之间

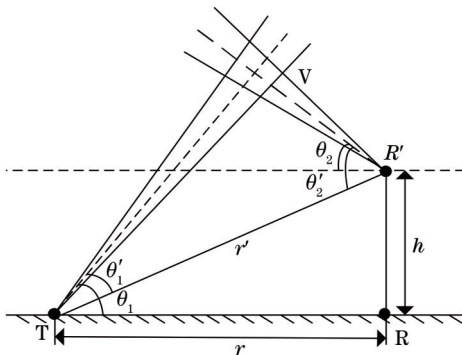


图2 NLOS通信模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of NLOS communication model

仅存在水平距离,为 r ;垂直通信即收发端仅存在高度差 h ;斜程通信即收发端之间存在 r 和 h ,此时收发端之间的直线距离变为 $r' = \sqrt{r^2 + h^2}$,发送仰角 θ_1 与接收仰角 θ_2 则分别变成 θ_1' 与 θ_2' 。水平通信场景中, $h_1 = r_1 \sin \theta_1$;垂直通信场景中,则不用考虑 h_1 ;而在斜程通信中, $h_1 = r_2 \sin \theta_2$ 。三种场景中,水平通信时 h_1 最大,影响也最大。

3 理论推导

3.1 大气折射率结构常数模型

在水平通信场景中,UVC性能主要受水平通信距离的影响;而在垂直以及斜程通信中, C_n^2 是不均匀的,且高度和温度对其影响较大。在不同的大气环境下,还应选取不同的大气折射率模型来描述湍流模型。针对内陆地区白天的湍流,通常用H-V模型^[16]描述:

$$C_n^2(h) = C_0^2 \exp\left(-\frac{h}{100}\right) + 5.94 \times 10^{-53} \times \left(\frac{v}{27}\right)^2 h^{10} \exp\left(-\frac{h}{100}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{100}\right), \quad (7)$$

式中: C_0^2 为地平面附近的大气折射率结构常数,典型值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; v 为近地面风速,通常取 $v = 21 \text{ m/s}$ 。对于紫外光NLOS通信, h_1 随着 θ_1, θ_2 以及 r 的变化而改变,当考虑 h_1 时,H-V模型可表示为

$$C_n^2(h') = C_0^2 \exp\left(-\frac{h'}{100}\right) + 5.94 \times 10^{-53} \times \left(\frac{v}{27}\right)^2 (h')^{10} \exp\left(-\frac{h'}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h'}{1500}\right), \quad (8)$$

式中: $h' = h + h_1$ 。

国际电信联盟通过对H-V模型进行改进,得到了夜间 C_n^2 随高度变化的模型,即HV-Night模型:

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 h^2 \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + C_0^2 \exp\left(-\frac{h}{100}\right), \quad (9)$$

式中: $v_{\text{RMS}} = \sqrt{v_g^2 + 30.69v_g + 348.91}$ 为垂直路径上的均方根风速, v_g 为近地面风速, $v_g = 3 + 17 \times \exp[-(h/1000 - 12.5)^2/16]$ 。同理,考虑 h_1 时,HV-Night模型可表示为

$$C_n^2(h') = 8.148 \times 10^{-56} v_{\text{RMS}}^2 (h')^2 \exp\left(-\frac{h'}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h'}{1500}\right) + C_0^2 \exp\left(-\frac{h'}{100}\right). \quad (10)$$

3.2 信噪比

大气湍流信道中,光波会发生振幅变化,在仅考虑湍流产生的通信误差而不考虑其他噪声的情况下,可以将振幅变化近似由大气湍流噪声所引起。设信号强度为 I_0 , 噪声强度为 $\langle I_n \rangle$, 大气湍流引起的 SNR^[17] 可以表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{I_0}{\langle I_n \rangle} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle}, \quad (11)$$

式中: χ 为湍流造成的对数振幅起伏。

在实际的光通信系统中,光从发射端出来经过光学透镜准直后可视为平面波,对于平面波,在弱湍流条件下的对数光强起伏可表示为

$$\sigma_1^2 = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}, \quad (12)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为光波长; L 为通信传输距离。

弱湍流条件下,对数光强起伏和对数振幅起伏方差的关系可以表示为 $\sigma_1^2 = 4\chi^2$, 紫外光 NLOS 散射通信过程中,由于光传播经过了两条路径 L_1 和 L_2 , 路径长度分别为 r_1 和 r_2 , 因此 SNR 可以表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle} = \frac{4}{\sigma_1^2} = 4 \left(\frac{1}{1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} r_1^{\frac{11}{6}}} + \frac{1}{1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} r_2^{\frac{11}{6}}} \right). \quad (13)$$

强湍流条件下,通过泰勒级数进行简化, SNR 可近似表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{1}{\langle \chi^2 + \chi^3 + \chi^4 + \dots \rangle} \approx \frac{1}{\xi \langle \chi^2 \rangle}, \quad (14)$$

式中: ξ 为闪烁强度因子, $1 \leq \xi \leq 2$ 。

3.3 信号衰减

紫外光 NLOS 散射链路的接收光功率的表达式^[18]为

$$P_{r, \text{NLOS}} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2} \right)} \times \exp \left[- \frac{K_e r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right], \quad (15)$$

式中: $K_e = K_a + K_s$, K_a 为吸收系数, K_s 为散射系数; P_s 为散射角 θ_s 的相函数。则路径损耗为

$$L = \frac{P_t}{P_{r, \text{NLOS}}}, \quad (16)$$

式中: P_t 为发射端的传输功率。

对于平面波情况下的直视链路而言,通过 Rytov 理论可以近似得到湍流导致的光束衰减^[19]为

$$\alpha_{\text{turb}} = 2 \sqrt{23.17 C_n^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} r^{11/6}}. \quad (17)$$

将非直视链路分为两条直视链路,因此, NLOS 通信链路上的光束衰减为

$$\alpha_{\text{turb}} = 2 \left[\sqrt{23.17 C_n^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} r_1^{11/6}} + \sqrt{23.17 C_n^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} r_2^{11/6}} \right]. \quad (18)$$

UVC 的信号衰减 S 则为路径损耗造成的衰减和大气湍流造成的 SA 之和:

$$S = L + \alpha_{\text{turb}}. \quad (19)$$

4 分析与讨论

针对不同场景下的紫外光 NLOS 单次散射通信,首先分析了三种场景中的光强分布特性,然后根据所提出的湍流模型,对紫外光 NLOS 通信性能进行仿真分析。本文所采用的紫外光 NLOS 单次散射通信系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 紫外光 NLOS 单次散射通信系统参数

Table 1 Parameters of ultraviolet NLOS single scattering communication system

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	260
Scattering coefficient K_s /km ⁻¹	0.550
Extinction coefficient K_e /km ⁻¹	0.802
Area of receiving aperture A_r /cm ²	1.77
Pulse power emitted P_t /mW	50
Beam divergence angle ϕ_1 /($^\circ$)	15
Receiving field of view ϕ_2 /($^\circ$)	30

4.1 紫外光 NLOS 散射通信的光强分布特性分析

图 3(a) 为不同收发仰角对 UVC 的影响, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $r = 200 \text{ m}$ 。当收发仰角从 $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ 增大为 $\theta_1 = \theta_2 = 40^\circ$ 时,信号能量逐渐减小,信号强度的 PDF 方差变化较小;但是,当收发仰角增大到 $\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$ 时,信号能量衰减较为严重,即随着 θ_1 和 θ_2 的同步增大,信号强度 PDF 方差变化增大,且能量衰减逐渐增大。图 3(b) 为 r 对 NLOS 通信的影响, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ 。当 r 从 100 m 增加到 400 m 时,信号能量衰减幅度较大,信号强度 PDF 方差较小; r 从 400 m 增加到 1000 m 时,信号能量衰减幅度较小,但是信号强度 PDF 方差变化较大。图 3(c) 为 h 对紫外光垂直通信的影响, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ 。当 h 从 100 m 增加到 400 m 时,信号能量衰减较大,信号强度 PDF 方差较小;当 h 继续增大,能量衰减逐渐变小,但是信号强度 PDF 方差开始逐渐变大。图 3(d) 为 h 对紫外光斜程通信的影响。 $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $r = 200 \text{ m}$, $\theta_1 = 75^\circ$, $\theta_2 = 15^\circ$ 时,随着 h 的增大,信号能量逐渐衰减,信号强度 PDF 方差变化较小;当 h 从 100 m 增加到 300 m 时,信号能量衰减较大;当 h 继续增大,信号能量衰减开始变小。与垂直通信相比,斜程通信时信号能量衰减较小,信号强度 PDF 方差变化也较小。图 3(e) 为收发仰角对斜程通信的影响, $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,

$r = 100 \text{ m}$, $h = 200 \text{ m}$ 。随着 θ_1 的增大, 信号能量衰减较大, 信号强度 PDF 方差变化较大, 但 θ_2 增大时信号能

量衰减很小, 信号强度 PDF 方差变化很小, 说明 θ_1 对通信信号能量衰减的影响比 θ_2 大。

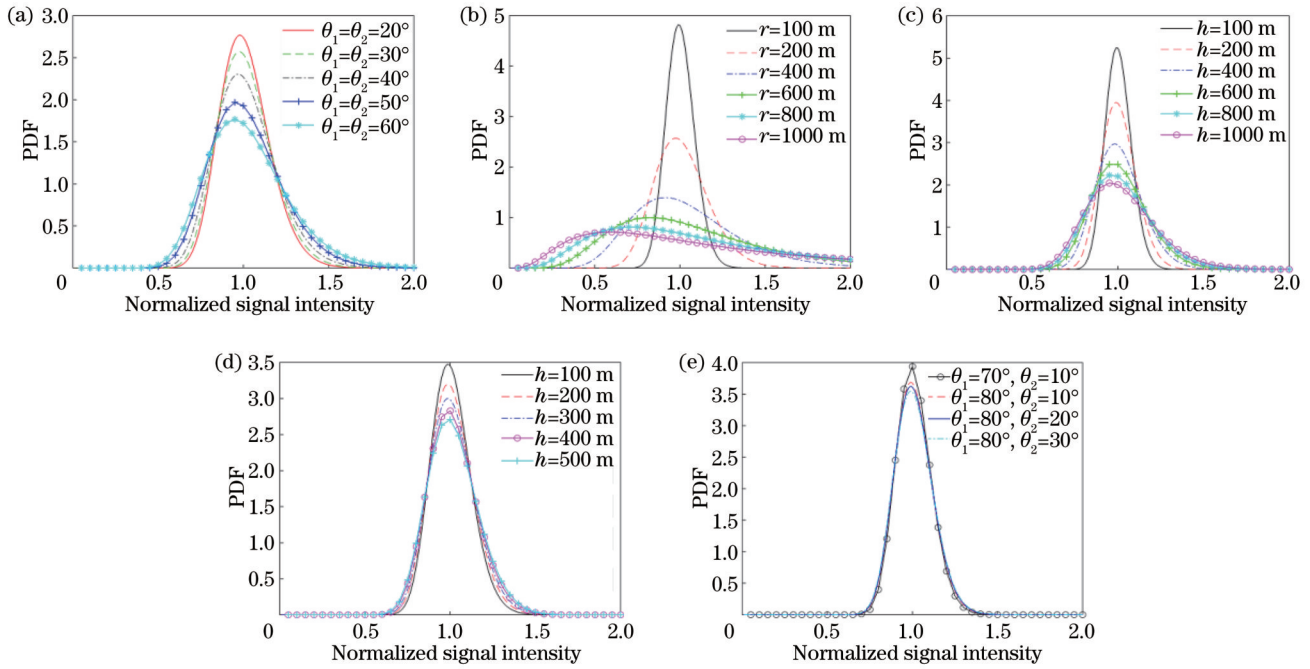


图 3 θ_1, θ_2, r 和 h 对紫外光在不同通信场景下光强分布的影响。(a) θ_1 和 θ_2 对 UVC 的影响; (b) r 对 NLOS 通信的影响; (c) h 对紫外光垂直通信的影响; (d) h 对紫外光斜程通信的影响; (e) θ_1 和 θ_2 对斜程通信的影响
 Fig. 3 Influence of θ_1, θ_2, r , and h on light intensity distribution of UV light in different communication scenarios. (a) Influence of θ_1 and θ_2 on UVC; (b) influence of r on NLOS communication; (c) influence of h on vertical communication of UV; (d) influence of h on oblique communication of UV; (e) influence of θ_1 and θ_2 on oblique communication of UV

垂直通信场景中, 紫外光 NLOS 通信中信号强度分布的 PDF 如图 4 所示, 设置 $r = 200 \text{ m}$, $h = 100 \text{ m}$, $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ 。当 C_n^2 从 $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 增大到 $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 在夜间随着 C_n^2 每增大一个数量级, 信号能量平均衰减为原来的 1/2.16, 信号能量衰减迅速; 在白天随着 C_n^2 每

增大一个数量级, 信号能量平均衰减为原来的 1/2.15, 白天通信时信号能量衰减小于夜间。但是白天的信号能量比夜间的近似大一倍, 通信性能较好; 白天信号强度的 PDF 方差比夜间的小, 信号强度较为稳定。在垂直通信时, 相较于夜间, 白天的通信性能更好。

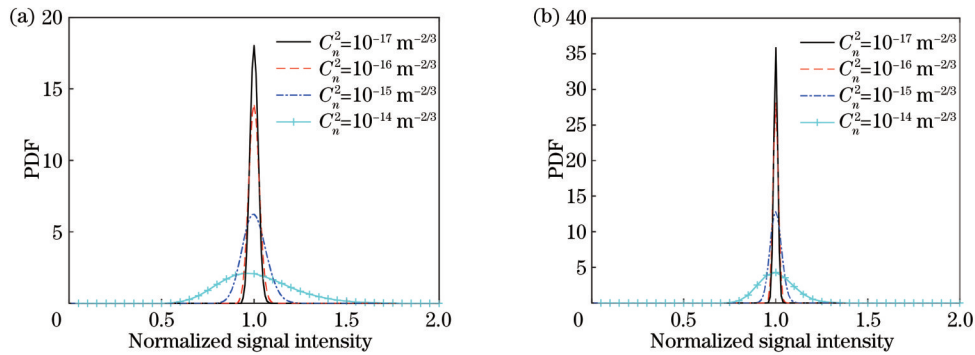


图 4 C_n^2 对紫外光垂直通信的影响。(a) 夜间 NOLS 通信; (b) 白天 NOLS 通信
 Fig. 4 Influence of C_n^2 on vertical communication of UV. (a) NOLS communication at night; (b) NOLS communication during day

在水平通信场景中, C_n^2 对紫外光水平通信的影响如图 5 所示。在夜间, 随着 C_n^2 每增大一个数量级, 信号能量平均衰减为原来的 1/2.09; 在白天, 随着 C_n^2 每增大一个数量级, 信号能量平均衰减为原来的 1/2.07。水平通信时, 白天和夜间的信号能量衰减比

垂直通信时均要较小一些, 同时信号强度的 PDF 方差也比垂直通信时小。但是, 白天的信号能量比夜间的近似大 3 倍, 通信性能更好。水平通信时, 白天信号能量衰减小于夜间, 白天的通信性能比夜间更好。

在斜程通信场景中, C_n^2 对 UVC 的影响如图 6 所

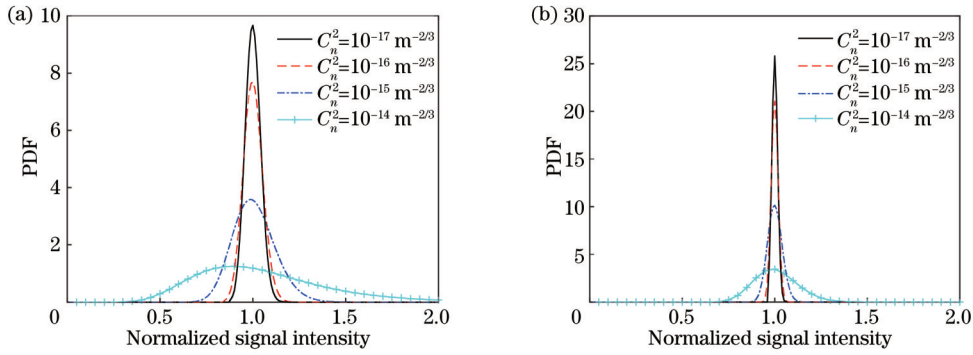


图 5 C_n^2 对紫外光水平通信的影响。(a)夜间NOLS通信;(b)白天NOLS通信

Fig. 5 Influence of C_n^2 on horizontal communication of UV. (a) NOLS communication at night; (b) NOLS communication during day

示,设置 $r=200\text{ m}$, $h=200\text{ m}$, $\theta_1=75^\circ$, $\theta_2=15^\circ$ 。在夜间,随着 C_n^2 每增大一个数量级,信号能量平均衰减为原来的 $1/2.03$;在白天,随着 C_n^2 每增大一个数量级,

信号能量平均衰减为原来的 $1/1.96$ 。斜程通信时,夜间的信号能量平均衰减比白天的较大,同时白天的信号能量比夜间的近似大 2 倍,通信性能更好。

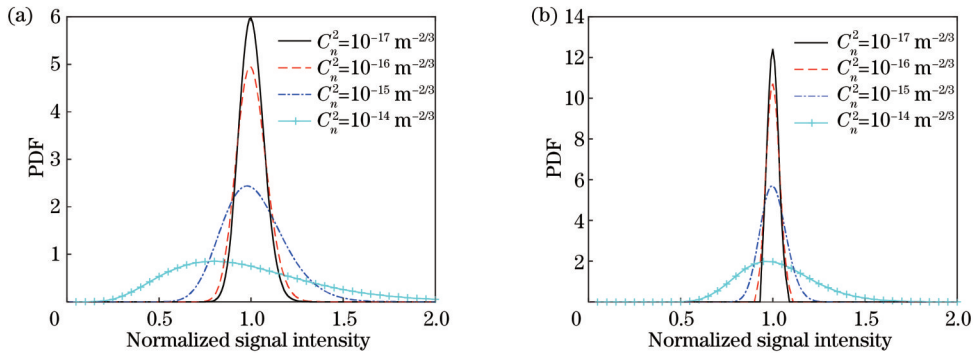


图 6 C_n^2 对紫外光斜程通信的影响。(a)夜间NOLS通信;(b)白天NOLS通信

Fig. 6 Influence of C_n^2 on oblique communication of UV. (a) NOLS communication at night; (b) NOLS communication during day

通过昼夜湍流模型在三种通信场景下对UVC进行仿真分析,随着湍流强度 C_n^2 从 $10^{-17}\text{ m}^{-2/3}$ 增大到 $10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$,夜间和白天的信号能量衰减的幅度逐渐增大;但是白天信号强度的PDF方差比夜间的更小,能量衰减较小,信号强度较为稳定,通信性能较好。在水平和垂直通信时,白天的信号能量平均衰减略小于夜间,即夜间湍流对UVC的影响大于白天;而在斜程通信时,白天的信号能量平均衰减较夜间大。无论在夜间还是白天,湍流影响垂直通信时的信号能量衰减程度比水平通信和斜程通信时均要大。随着湍流强度 C_n^2 的增大,PDF方差逐渐变大,曲线分布逐渐偏离光强均值,夜间比白天的偏离程度更大,同时,夜间NOLS通信时PDF分布曲线的拖尾归零时的收敛速度比白天时的较慢,说明信道的不均匀性增加导致了信号强度起伏加剧,而且夜间信号受到的影响比白天的更大。

4.2 紫外光NLOS单次散射湍流信道性能分析

根据本文建立的紫外光NLOS单次散射通信链路模型, h_1 会随着收发端仰角的变化而变化,考虑 h_1 时,海拔也随之发生变化,进而对湍流的变化产生一定的影响。因此,下面将综合分析 h_1 对紫外光NLOS通

信性能的影响。

h_1 对 SNR 的影响如图 7 所示。当海拔小于

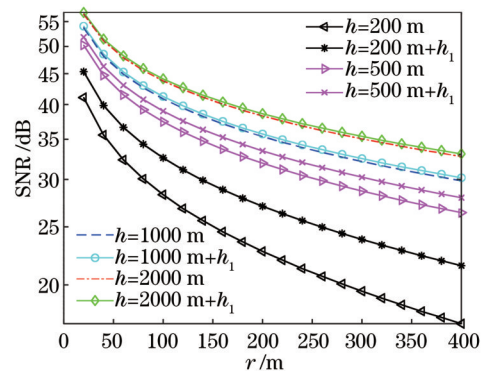


图 7 h_1 对SNR的影响

Fig. 7 Effect of h_1 on SNR

1000 m 时, h_1 对 SNR 的影响较大;且随着海拔的增大, SNR 保持衰减;当海拔大于 1000 m 时, h_1 对 SNR 的影响较小, SNR 的衰减幅度随海拔的增加基本保持不变。同时,当通信距离不断增大时,海拔越高则 SNR 衰减得越慢,未考虑 h_1 时 SNR 随海拔的增加衰减的幅

度比考虑 h_1 时更快。

图 8 展示了在水平通信场景中不同 h 下湍流强度对 UVC SNR 的影响。由图 8 可知, 无论白天还是夜间: 当 $h < 1500$ m 时, SNR 的增大幅度随海拔的增高保持衰减; 当 $h > 1500$ m 时, 随着海拔的继续增高, SNR 的增幅保持不变。但是由图 8(a) 和图 8(b) 可知: 昼夜通信时海拔的增加对 SNR 的影响较小, 白天通信

时 SNR 的增幅比夜间更小; 当海拔在 1000 m 内时, 随着海拔的增高和通信距离的增大, 昼夜间通信的 SNR 变化保持相同; 当海拔大于 1000 m 时, 夜间通信时的 SNR 相较于白天开始增大, 海拔每增高 500 m, 夜间通信时 SNR 的增幅约为白天的 5 倍, 说明夜间在海拔 2000 m 以上时通信性能较好。

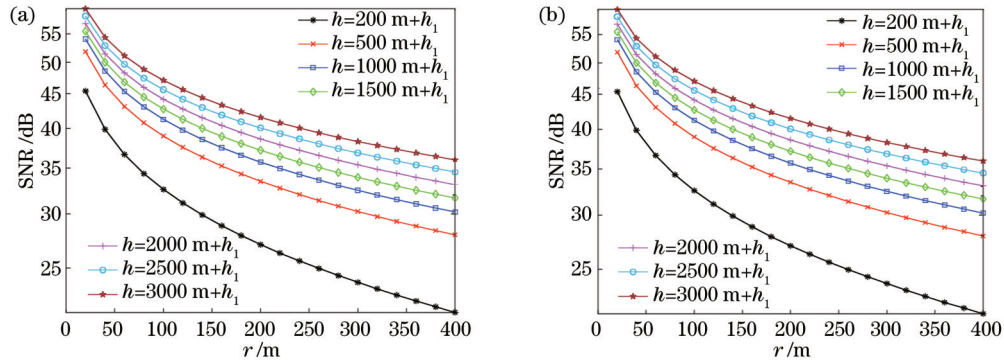


图 8 h 对紫外光水平通信 SNR 的影响。(a) 夜间 NOLS 通信; (b) 白天 NOLS 通信

Fig. 8 Influence of h on SNR of UV horizontal communication. (a) NOLS communication at night; (b) NOLS communication during day

图 9 显示了发散角和接收视场角对传输系统通信衰减的影响, 设置 $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $r = 200$ m, $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ 时, 信号衰减随接收视场角的增大逐渐减小。随着发散角 ϕ_1 的增大, 信号衰减整体上逐渐减小, 但是存在两个最优发散角使得信号衰减最小, 分别是 $\phi_1 = 30^\circ$ 和 $\phi_1 = 50^\circ$ 。

当 $h > 500$ m 时, h 增大则信号衰减的变化较小, 这是因为近地面的湍流强度较强, 对信号衰减的影响较大, 随着海拔的升高湍流强度变弱, 其影响也逐渐减小。

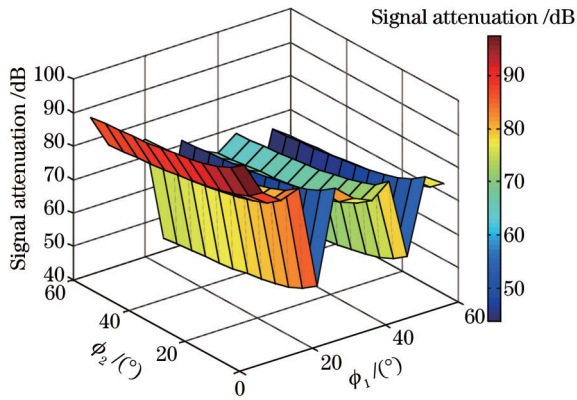


图 9 ϕ_1 和 ϕ_2 对通信系统信号衰减的影响

Fig. 9 Influence of ϕ_1 and ϕ_2 on signal attenuation of communication system

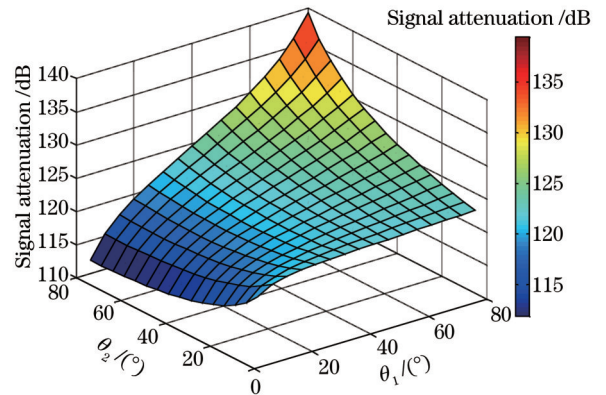


图 10 θ_1 和 θ_2 对通信系统信号衰减的影响

Fig. 10 Influence of θ_1 and θ_2 on signal attenuation of communication system

图 10 显示了收发仰角的变化对 NLOS 通信的影响, 设置 $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $r = 200$ m, $\phi_1 = 15^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$, 当收发仰角逐渐变大时, 信号衰减也不断增大, 同时, 发射端仰角对信号衰减的影响则更为显著。图 11 表明: 无线 NLOS 通信的信号衰减随着海拔高度 h 和通信距离 r 的增大而增大; 当 $r < 200$ m 时, 信号衰减较小; 当 $r > 200$ m 时, 随 r 的增加信号衰减显著增大; 当 $h < 500$ m 时, 随着 h 的增大信号衰减逐渐变小;

5 结 论

根据建立的低空大气湍流无线紫外光 NLOS 单次散射链路模型, 首先分析了不同因素影响 UVC 的光强概率分布; 根据昼夜湍流模型, 对比分析了不同高度变化对 UVC 性能的影响, 然后对紫外光在低空大气湍流信道中的 SNR、信号衰减进行了仿真分析。结果表明, 本文建立的紫外光 NLOS 通信模型可以更加准确地对大气湍流信道下的 UVC 性能进行分析, 收发端之间光束相交形成的紫外光有效散射体距离收发端水平面的垂直高度 h_1 对紫外光 NLOS 单次散射通信的性

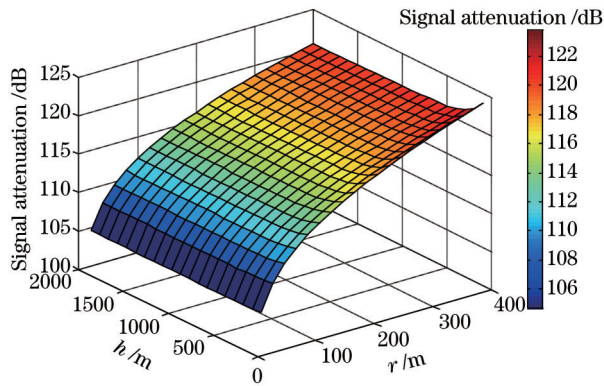


图 11 h 和 r 对通信系统信号衰减的影响

Fig. 11 Influence of h and r on signal attenuation of communication system

能有较大的影响。因此,在后续的紫外光单次散射通信建模中,需考虑 UVC 场景以及 h_1 的影响,这为无线 UVC 系统的研究提供了理论基础,对 UVC 系统的实际应用开发具有一定的意义。未来的工作将研究 h_1 对无线紫外光多发多收通信系统的影响。

参 考 文 献

- [1] 彭木根, 袁仁智, 王志峰, 等. 紫外光通信: 原理、技术与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(3): 13-18.
Peng M G, Yuan R Z, Wang Z F, et al. Ultraviolet communication: principle, techniques, and prospects[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(3): 13-18.
- [2] Ding H P, Chen G, Majumdar A K, et al. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8038: 80380J.
- [3] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 大气折射率结构常数 C_n^2 高度分布统计特性分析[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(2): 83-88.
Sun G, Weng N Q, Xiao L M. Statistical characteristics of vertical distribution of atmospheric structure constant of refractive index C_n^2 [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(2): 83-88.
- [4] Liao L C, Li Z N, Lang T, et al. Turbulence channel test and analysis for NLOS UV communication[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9224: 92241A.
- [5] 谢孟桐, 李建华, 徐智勇, 等. 弱湍流下斜程逆向调制无线光通信性能分析[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1801002.
Xie M T, Li J H, Xu Z Y, et al. Performance analysis for modulating retro-reflector FSO communications in weak turbulent atmosphere on slant path[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1801002.
- [6] 杨尚君, 柯熙政, 吴加丽, 等. 利用二维反射镜实现无线光通信快速对准[J]. 中国激光, 2022, 49(11): 1106001.
Yang S J, Ke X Z, Wu J L, et al. Fast alignment of wireless optical communication using two-dimensional mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(11): 1106001.
- [7] Drost R, Lang T, Chen G, et al. Long-distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis: experimentation and modelling[J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 223-231.
- [8] 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.
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.
- [9] Cao T, Song J, Pan C Y. Simplified closed-form single-scatter path loss model of non-line-of-sight ultraviolet communications in noncoplanar geometry[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(2): 6100209.
- [10] 万超, 郝浩, 赵清源, 等. 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500001.
Wan C, Hao H, Zhao Q Y, et al. Application of single photon detection in wireless optical communication transceiver technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0500001.
- [11] Shan T, Ma J S, Wu T F, et al. Single scattering turbulence model based on the division of effective scattering volume for ultraviolet communication[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(12): 15-19.
- [12] Zhao T F, Xie Y, Zhang Y. Connectivity properties for UAVs networks in wireless ultraviolet communication[J]. Photonic Network Communications, 2018, 35(3): 316-324.
- [13] 肖后飞. 紫外光通信系统传输模型研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014: 3-4, 129-130.
Xiao H F. Study on propagation models of ultraviolet communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 3-4, 129-130.
- [14] Ambrish, Chung Y H. Secure NLOS ultraviolet communication against active/passive eavesdropping attacks[J]. Optics Communications, 2021, 501: 127378.
- [15] 强若馨, 赵尚弘, 王翔, 等. 高空大气湍流影响下紫外光非直视链路闪烁效应研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(4): 677-681.
Qiang R X, Zhao S H, Wang X, et al. Influence of high atmosphere turbulence on scintillation in non-line-of-sight ultraviolet channel[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(4): 677-681.
- [16] Majumdar A K. Advanced free space optics[M]. Cham: Springer, 2014.
- [17] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 113-114.
Ke X Z, Deng L J. Wireless communication[M]. Beijing: Science Press, 2016: 113-114.
- [18] 赵太飞, 柯熙政, 侯兆敏, 等. 无线紫外光通信组网链路性能分析[J]. 激光技术, 2011, 35(6): 828-832.
Zhao T F, Ke X Z, Hou Z M, et al. Link performance analysis of wireless ultraviolet network[J]. Laser Technology, 2011, 35(6): 828-832.
- [19] Xiao H F, Zuo Y, Wu J, et al. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation model in random turbulent medium[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3366-3369.