

高空湍流影响下紫外光多径散射链路模型

强若馨 赵尚弘 王 翔 刘 韵

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要 考虑散射链路所在高空大气中温度、压强、臭氧浓度和湍流垂直强度的分布规律,依据 Rayleigh 散射理论,提出紫外光多径散射链路模型。将散射体划分为多个散射元,各散射元对应一组路径,并依照不同路径划分信号光,计算其信号强度;利用对数正态分布和非直视链路的湍流模型,分别计算不同路径的信号强度概率密度分布;用所有概率密度函数卷积得到接收端各路径信号叠加的强度分布和链路损耗。根据实际大气环境仿真得到:新模型得到的信号强度概率密度分布较原模型更集中,紫外光的消光系数受吸收系数影响显著,二者垂直分布曲线只在 15 km 以下略有差异。在高空 2~14 km 范围内,当收发端位于 11 km 左右闪烁指数存在极大值,而收发端位于 6 km 左右闪烁指数最小。综合考虑湍流效应和链路损耗,高空紫外光通信可将收发端安置于 10 km 高度以下。

关键词 大气光学;紫外光通信;大气湍流;Rayleigh 散射;对数正态分布

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605002

Ultraviolet Multipath Scattering Link Model under the Influence of High Altitude Turbulence

Qiang Ruoxin Zhao Shanghong Wang Xiang Liu Yun

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract Considering the air pressure, temperature, ozone concentration and turbulence vertical distribution of scattering communication link in the upper-air, a ultraviolet multipath scattering link model is modified, combined with Rayleigh scattering theory. The scattering volume is divorced into scattering elements and each element corresponds to every path. Signal strengths of each beams of laser divorced according to different paths are computed respectively. The probability density distributions of each non-line-of-sight signal strengths are calculated by logarithm-normal distribution and non-line-of-sight link turbulence model. Finally, total signal strength probability densities of each path signal in receiving terminal and the link losses are got by the way of each probability density convolutions. According to the factual atmosphere environment, the results show that the newly built probability density distribution is more concentrated. The differential distinction between extinction coefficient and absorption coefficient vertical distribution functions lies 15 km, due to the great impact of ozone absorption. At the range from 2 km to 14 km in the upper-air, scintillation index is higher with transmitter and receiver at the height of 11 km, while it is the lowest with transmitter and receiver at the height of 6 km. Considering turbulence and path loss, transmitter and receiver can be set below 10 km in the upper-air when ultraviolet communication is used in high atmosphere.

Key words atmospheric optics; ultraviolet communication; atmosphere turbulence; Rayleigh scattering; logarithm-normal distribution

OCIS codes 010.1030; 010.1310; 010.1330; 010.1320; 060.4510

1 引 言

自 20 世纪 30 年代起,紫外光通信就以低窃听率、低分辨率、抗干扰能力强、全方位性、非直视通

信、全天候工作等多项优点,成为一种特殊的保密通信手段,被国内外科研机构所重视。近 30 年来,国际上在短距离紫外通信方面进行了大量研究,覆盖

收稿日期: 2013-10-21; **收到修改稿日期**: 2013-12-18

作者简介: 强若馨(1990—),女,硕士研究生,主要从事紫外光通信方面的研究。E-mail: qiangruoxin@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

范围从基本原理到实验系统等多方面^[1-8]。国内对紫外光的研究主要集中在近地面研究,包括紫外光自组织网络、传输距离影响因素、非直视链路模型、紫外光通信调制、编码、紫外光通信实验测试系统设计等^[9-12],但是对高空紫外光大气传输特性和信道模型的研究甚少。因此,大气信道模型研究仍是紫外光通信研究的难点和重点问题。

激光在大气湍流的作用下会产生光强闪烁、光束飘移和湍流散斑现象。严重的散射效应使光强闪烁成为大气湍流对紫外激光的主要影响因素。目前,多数文献中对于湍流强度、散射系数、吸收系数等参数只是人为赋值或引用,并没有依据具体的大气环境而定^[7-8]。另外,文献^[7-8]中的紫外光湍流模型是将发射端的光信号集中在仰角方向的路径上,把散射造成的多径效应理想化为一条路径,以该路径的特点计算信号强度概率密度分布,从而得到湍流对通信系统的影响效果。若散射体覆盖的大气环境有所差异,单纯研究仰角方向的信号不能准确地反应湍流对紫外光通信系统的影响。因此本文在考虑高空大气环境中温度、压强、臭氧浓度、湍流强度分布情况的基础上,详细给出散射系数、吸收系数和消光系数计算方法及变化规律;并将散射的光信号按路径的不同划分,分别计算其信号强度概率密度分布函数。最终以多组路径到达接收端的信号强度之和作为研究对象,分析其归一化强度的分布规律和链路损耗在空间的垂直分布。

2 紫外光通信链路闪烁模型

2.1 湍流闪烁模型

紫外光通过散射体中的散射元改变光线传播方向实现非直视通信,因此接收到的信号强度是到达接收端的多组路径信号强度之和。

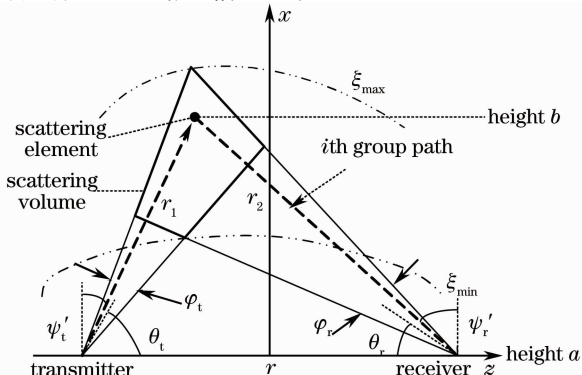


图1 紫外光单次散射链路模型

Fig.1 Ultraviolet single scattering link model

紫外光非直视单次散射链路模型如图1所示。发射端与接收端位于同一水平面上,通信距离为 r ,发射仰角为 θ_t ,发散角为 φ_t ,接收仰角为 θ_r ,视场角为 φ_r ,发射端发出的信号强度为1。在一次散射通信中,散射体被分成 M 个体积为 ΔV 的散射元,若有多条路径经过同一散射元到达接收端,则将这些路径划分为一组散射路径,每一组中各条路径的信号强度、链路长度和所处大气环境相近。在图1中所示的第 i 组路径中,从发射端到达散射元的平均信号强度为 $i_{ox} = \frac{\exp(-K_e \cdot r_1)}{4\pi \sin^2(\varphi_t/2)r_1^2} \Delta V$,传播距离 r_1 、湍流影响下从发射端到达散射元的信号强度是 i_{rx} ,其概率密度函数为 $f_X(i_{rx})$,从散射元到达接收端的传播距离为 r_2 ,平均信号强度 i_{oy} 为^[5-6]

$$i_{oy} = i_{rx} \cdot A_r \cdot p(\cos \theta_s) \cdot \frac{K_s}{4\pi} \cdot \frac{\exp(-K_e \cdot r_2)}{r_2^2}, \quad (1)$$

式中 A_r 是接收孔径面积, K_e 是大气消光系数, K_s 是散射系数, $p(\cos \theta_s)$ 是散射相函数。湍流条件下从散射元到达接收端的信号强度是 i_{ry} ,其条件概率密度函数为 $f_{Y|X}(i_{ry} | i_{rx})$,则该路径从发射端到达接收端的信号强度边缘分布概率密度函数为^[7-8]

$$f_i(I_{ry}) = f_Y(i_{ry}) = \int_0^{+\infty} f_{Y|X}(i_{ry} | i_{rx}) \cdot f_X(i_{rx}) d(i_{rx}). \quad (2)$$

经过散射到达接收端的 M 组路径叠加的信号强度概率密度分布为各路径概率密度函数卷积,即

$$f_I(I_{ry}) = f_1 f_2 \cdots f_M, \quad (3)$$

若 I_{oy} 为所有路径 i_{oy} 之和,则接收端归一化强度概率密度分布为

$$f_{\text{NLOS}}(I) = f_I\left(\frac{I}{I_{oy}}\right) \cdot I_{oy}. \quad (4)$$

非直视链路的闪烁指数依照定义式计算, $\langle \cdot \rangle$ 表示系统平均:

$$\sigma_{\text{NLOS}}^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1. \quad (5)$$

接收端叠加的信号强度期望值为 $E(I) = \int_0^{+\infty} I \cdot f_{\text{NLOS}}(I) dI$,则湍流、散射、吸收共同影响下的链路损耗为

$$L = 10 \lg[1/E(I)]. \quad (6)$$

在直视通信情况下,收发端仰角 θ_t 与 φ_t 均为 0° ;发射端发散角为 φ_t ,接收端视场角为 φ_r ;通信距离为 r ;由于大部分光子不经过散射而到达接收端,可将接收孔径面积划分为 M 个大小为 ΔA 的面积微

元,则到达接收端的第 i 组路径信号强度为 $i_o = \Delta A \frac{\exp(-K_e \cdot r)}{4\pi \sin^2(\varphi_r/2)r^2}$, 其概率密度分布为 $f_i(i_r)$ 。对 M 组路径的 $f_i(i_r)$ 按照(3)式进行卷积计算可得到直视通信情况下接收端的信号强度概率密度分布 $f_I(I_r)$ 。对 $f_I(I_r)$ 进行归一化得到接收端归一化强度概率密度分布 $f_{\text{LOS}}(I) = f_I\left(\frac{I_r}{I_o}\right) \cdot I_o$, 其中 I_o 是 M

组路径的 i_o 之和。用(5)式可得到直视链路闪烁指数 σ_{LOS}^2 。

2.2 信号强度对数正态分布模型

对于非直视链路,闪烁指数采取如下方式计算^[13]。结合图1,第 i 组路径到达散射元的闪烁指数及信号强度分布分别为

$$\sigma_i^2 = 4 \times 0.5631k^{7/6} (\sec \psi'_t)^{11/6} \int_a^b C_n^2(h) \left[\frac{h(r_1 - h)}{r_1} \right]^{5/6} dh, \quad (7)$$

$$f_X(i_{rx}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1 i_{rx}}} \exp\left[-\left(\ln \frac{i_{rx}}{i_{ox}} + \frac{1}{2}\sigma_1^2\right)^2 / 2\sigma_1^2\right]. \quad (8)$$

第 i 组路径到达接收端的闪烁指数及信号强度条件概率密度函数分别为

$$\sigma_i^2 = 4 \times 0.5631k^{7/6} (\sec \psi'_r)^{11/6} \int_a^b C_n^2(h) \left[\frac{h(r_2 - h)}{r_2} \right]^{5/6} dh, \quad (9)$$

$$f_{Y|X}(i_{ry} | i_{rx}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2 i_{ry}}} \exp\left[-\left(\ln \frac{i_{ry}}{i_{oy}} + \frac{1}{2}\sigma_2^2\right)^2 / 2\sigma_2^2\right], \quad (10)$$

式中 $k=2\pi/\lambda$ 是波数。

对于直视链路第 i 组路径闪烁指数 σ_i^2 及信号强度分布 $f_i(i_r)$ 的计算如下

$$\sigma_i^2 = 4 \times 0.124k^{7/6} r^{11/6} C_n^2(a), \quad (11)$$

$$f_i(i_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i i_r}} \exp\left[-\left(\ln \frac{i_r}{i_o} + \frac{1}{2}\sigma_i^2\right)^2 / 2\sigma_i^2\right]. \quad (12)$$

2.3 散射系数垂直分布

由于霾气溶胶层的标高近似 1 km,随着高度增加 Mie 散射比 Rayleigh 散射减小快^[10]。因此,散射区域较高的紫外光通信可以只考虑 Rayleigh 散射,单次散射相函数取

$$p(\cos \theta_s) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta_s). \quad (13)$$

空气密度随着大气高度增加而降低, Rayleigh 散射系数 K_s 与空气密度有如下关系: $K_s = K_{s0}\rho/\rho_0$ 。由气体状态方程知 $\rho = \rho_0 PT_0/(P_0 T)$, 其中, K_{s0} 、 ρ_0 、 P_0 、 T_0 分别是参考位置的散射系数、空气密度、大气压强和温度; K_s 、 ρ 、 P 、 T 分别是任意位

置的散射系数、空气密度、大气压强和温度。由此将 Rayleigh 散射系数 K_s 计算公式修订为^[14]

$$K_s = K_{s0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}, \quad (14)$$

$$K_{s0} = 1.06 \times \frac{8\pi^2 (n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4}, \quad (15)$$

式中 n 是大气折射率, $n = \frac{0.05791817}{238.0185 - \lambda^{-2}} + \frac{0.00167909}{57.362 - \lambda^{-2}} + 1$; N 是空气数密度, 在大气压为 101325 Pa、温度为 288.15 K 时近似取 $2.547 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 。

不同地区气温随高度变化不同而不同,但近似呈分段线性分布,以 35°N, 107.5°E 为例^[15],

$$\gamma = \frac{\partial T}{\partial h} = -0.0061 \text{ }^\circ\text{C/m}, h \leq 17 \text{ km}, \quad (16)$$

$$\gamma = \frac{\partial T}{\partial h} = 0.0016 \text{ }^\circ\text{C/m}, h > 17 \text{ km}, \quad (17)$$

式中 γ 是温度随高度的变化率, h 表示高度。

气压与大气高度和温度的关系表示为

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{2.7 \times 10^{-6} \mu}{R} \left[\frac{z}{\gamma} - \frac{T_0}{\gamma^2} \ln\left(\frac{T_0 + \gamma \cdot z}{T_0}\right) \right] - \frac{9.7713 \mu}{R} \frac{1}{\gamma} \ln\left(\frac{T_0 + \gamma \cdot z}{T_0}\right), \quad (18)$$

式中 P_0 、 T_0 分别是地表附近大气压强和温度,一般取标准大气压为 101325 Pa、温度为 288.15 K; R 是

大气普遍常数 $8.314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, μ 是大气摩尔质量取值为 28.9635 kg/mol 。

2.4 吸收系数垂直分布

臭氧浓度和通信波长直接影响吸收系数 K_a 。已有研究指出在高度 10~15 km 大气层中的臭氧浓度低于地面臭氧浓度,15~20 km 高空臭氧浓度急剧增加。对于波长为 266 nm 的紫外光,吸收系数 $K_a=0.0025 d$,其中 d 为臭氧浓度(体积浓度,单位 ppb,即十亿万气体体积中含有臭氧的体积数)^[9],可见该波长的吸收系数 K_a 与臭氧浓度呈正

$$C_n^2 = 8.148 \times 10^{-56} v_{RMS}^2 h^2 \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + C_0 \exp(-h/100), \quad (19)$$

式中 C_0 是地面附近折射率结构常数,典型值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$; $v_{RMS} = \sqrt{v_g^2 + 30.69 v_g + 348.91}$ 是垂直路径风速均方根; v_g 是近地面风速, $v_g = 3 + 17 \exp[-(h/1000 - 12.5)^2 / 16]$; h 是离开地面高度;则折射率结构常数垂直分布如图 2 所示。

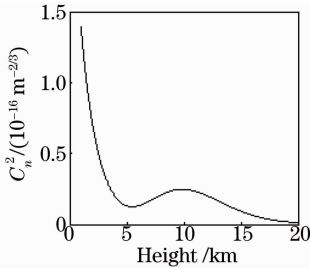


图 2 折射率结构常数垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of the refraction structure parameter

3 仿真结果

由上述分析可知,不同高度大气对紫外光造成的吸收、散射和湍流效应有差异,且收发端所在高度、仰角、通信距离影响着紫外光传播路径所处的大气环境。为得到高空环境对链路损耗、闪烁指数及强度分布的影响,仿真不变参数 $A_r = 1.77 \text{ cm}^2$, 波长 $\lambda = 266 \text{ nm}$, $P_0 = 101325 \text{ Pa}$, $T_0 = 288.15 \text{ K}$, 发散角和视场角均为 15° , 发射端与接收端在同一水平面上并且仰角相等,臭氧浓度使用 40°N 中国某城市春季测量值^[17]。

紫外光在高空大气中的散射系数 K_s 、吸收系数 K_a 和消光系数 K_e 如图 3 所示。图 3 中明显看出散射系数随高度增加而持续减小;由于受大气温度影响,吸收系数与臭氧浓度近似呈正比关系,变化趋势一致。因此,受臭氧浓度影响,在高空 10~15 km,吸收系数较小。消光系数 K_e 为散射系数 K_s 与吸收系数 K_a 之和,但由于散射系数较小,消光系数与

比关系。

大多数研究臭氧浓度垂直分布的文献多用臭氧分压单位毫帕度量,臭氧分压与浓度换算关系为: $1 \text{ mPa} = 10^{14} / (1.7322 \times 21.414 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{T})$ 。

2.5 折射率结构常数垂直分布

国际电联依据大量实验观测数据于 2001 年提出折射率结构常数垂直分布模型^[16]为

吸收系数在高空 15 km 以下略有差异,在高空 15 km 以上几乎重合。由此可见在高空大气环境中高空紫外光受臭氧吸收作用明显。

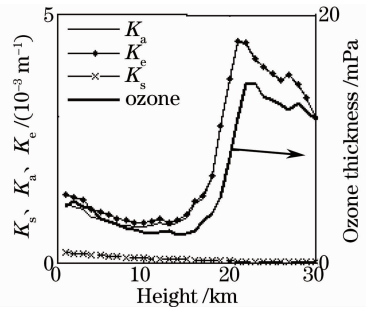


图 3 K_s 、 K_a 和 K_e 垂直分布

Fig. 3 Vertical distributions of K_s , K_a and K_e

令通信距离为 1 km,仰角由 0° 至 60° 变化,收发端所在高度由 1 km 至 20 km 变化时,散射、吸收、湍流共同影响下的链路损耗如图 4 所示。由图 4 可知:收发端在同一高度,链路损耗会随着仰角增大而增加。当收发端位于高空 10 km 以下,链路损耗较小;在 10 km 以上的大气环境中消光系数增大,损耗也迅速增大。因此,如果要在高空 20 km 以内应用紫外通信,可将收发端设置在高空 10 km 以下,从而取得较好性能。

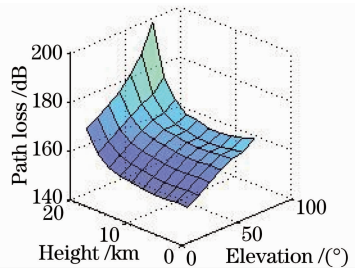


图 4 链路损耗垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of the path loss

令仰角为 40° ,通信距离为 1 km,收发端所在高度分别取 5、8、11 km,在大气湍流影响下接收端的

归一化强度概率密度见图 5。验证得到图中各概率密度曲线积分为 1。结合图 2 可知,在高空 5~11 km 处湍流强度随着高度增加而增强,因此信号强度分布也会随着高度增加而更加分散。当散射元体积 ΔV 取为整个散射体体积,该模型退化为文献 [7-8] 中的湍流模型,仿真结果如图 6 所示。可以看出该结果信号强度不如新模型分布密集。其原因:本文提出的模型是小信号概率密度分布函数经过多次卷积并归一化得到。仿真可验证,当多个变量均服从对数正态分布,且其期望值之和与单个服从对数正态分布的变量的期望值相等时,由多个变量的分布函数经过卷积并归一化而得到的概率密度函数的峰值会比单个变量的概率密度分布函数的峰值高,即分布更加密集。因此本文提出的模型较原模型分布更密集。

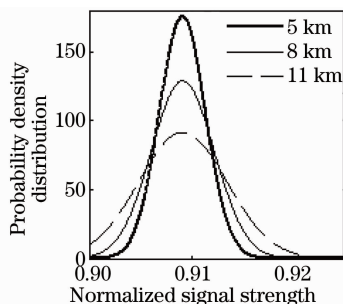


图 5 多径模型归一化信号强度概率密度分布
Fig. 5 Normalized signal strength probability density distributions of multipath scattering model

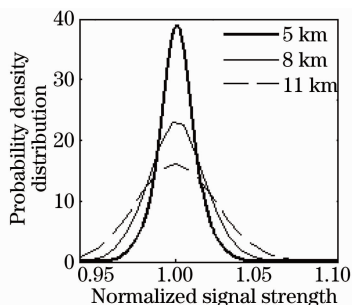


图 6 原模型归一化信号强度概率密度分布
Fig. 6 Normalized signal strength probability density distributions of old model

通信距离为 1 km,仰角分别为 20°、40°、60°,收发端位于高空 2~14 km,接收信号闪烁指数的空间垂直分布如图 7 所示。该图与折射率常数垂直分布吻合,收发端在高空 5~6 km 闪烁指数有极小值,在 11 km 左右存在极大值,并且通信距离一定时,仰角越小闪烁指数越小。表 1 体现了图 7 中收发端分别设置在 2、6、11、14 km 大气高度时接收信号的闪烁指数具体数值。

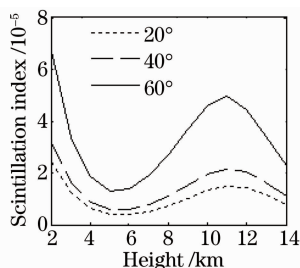


图 7 闪烁指数垂直分布

Fig. 7 Vertical distributions of the scintillation index

表 1 通信系统在不同高度和仰角条件下的闪烁指数

Table 1 Scintillation indexes of communication system at different heights and elevations

Elevation / (°)	Height / km			
	2	6	11	14
20	2.4×10^{-5}	4.0×10^{-6}	1.5×10^{-5}	8.2×10^{-6}
40	3.1×10^{-5}	6.0×10^{-6}	2.1×10^{-5}	1.2×10^{-5}
60	6.6×10^{-5}	1.4×10^{-5}	5.0×10^{-5}	2.3×10^{-5}

图 8 为直视条件下,收发端分别设置在高度 2~14 km,通信距离在 0.1~1 km 范围内变化时,接收信号的闪烁指数。当高度一定时,通信距离增大则闪烁指数增大;同时可看出,随着通信距离的增大,在大气湍流相对较强的区域,如高空 2、11 km,闪烁指数增长较快,反之在高空 6、14 km,闪烁指数增长较慢,因此,随着通信距离的增大,不同高度的湍流强度对闪烁指数的影响趋于明显。表 2 体现了以直视通信的方式在不同大气高度设置收发端,分别以 100、500、1000 m 的距离进行通信接收端信号的闪烁指数具体数值。通过对比表 1、表 2 可知:直视通信的闪烁指数小于非直视通信;并且在通信距离一定时,通信仰角增加将导致闪烁指数增大,闪烁效应更加明显。

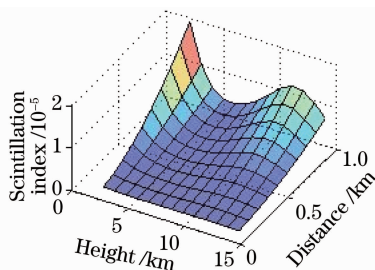


图 8 闪烁指数与高度和距离的关系
Fig. 8 Relationship of scintillation index, height and distance

图 9 为收发端所在 10 km 高空的湍流强度下,仰角从 20°到 60°变化,通信距离从 100 m 到 1 km 变化时,接收信号闪烁指数的变化趋势。从图中可

表 2 通信距离及收发端高度影响下的闪烁指数

Table 2 Scintillation indexes under the influence of height and communication distance

Distance / m	Height /km			
	2	6	11	14
100	2.8×10^{-7}	4.3×10^{-8}	1.7×10^{-7}	9.2×10^{-8}
500	5.3×10^{-6}	8.2×10^{-7}	3.2×10^{-6}	1.8×10^{-6}
1000	1.9×10^{-5}	2.9×10^{-6}	1.1×10^{-5}	6.3×10^{-6}

明显看出仰角或通信距离增大时闪烁指数增加。其因为:角度或通信距离的增大会导致激光在湍流

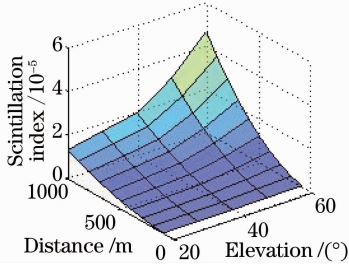


图 9 闪烁指数与仰角和距离的关系

Fig. 9 Relationship of scintillation index, elevation and distance

大气中的路径长度增加,闪烁效应加重。表 3 反映的是通信终端设置在 10 km 高空湍流强度下,分别以 20°、40°、60°仰角和 0.1、0.5、1 km 距离通信时的接收信号闪烁指数具体数值。

表 3 仰角和通信距离影响下的闪烁指数

Table 3 Scintillation indexes under the influence of elevation and distance

Distance / m	Elevation /(^{\circ})		
	20	40	60
100	2.1×10^{-7}	2.9×10^{-7}	6.3×10^{-7}
500	3.7×10^{-6}	5.4×10^{-6}	1.2×10^{-5}
1000	1.1×10^{-5}	2.0×10^{-5}	4.4×10^{-5}

收发端仰角设置为 20°、40°、60°,接收端的归一化信号强度概率密度分布函数分别如图 10 所示,三者的通信距离均在在 0.2~1 km 变化,通信终端所在高度 10 km。从分布函数的峰值可看出分布的密集程度。总体而言:仰角越小或通信距离越短,信号强度分布越密集。信号期望值约为 0.909,该值与运算精度有关,精度越高越接近 1。

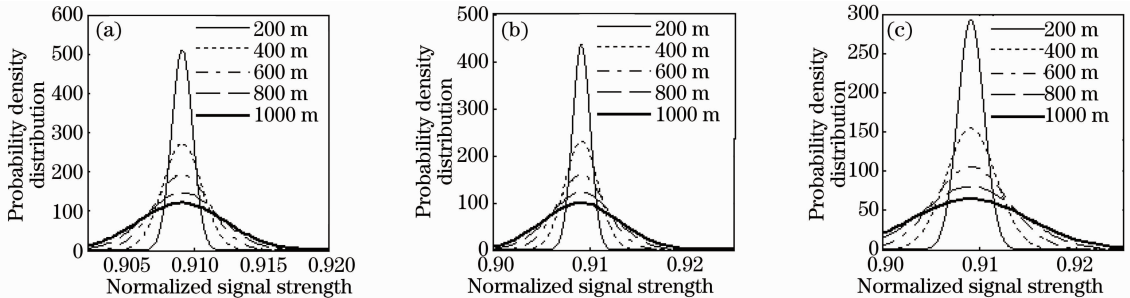


图 10 不同仰角的归一化信号强度概率密度。(a) 20°; (b) 40°; (c) 60°

Fig. 10 Normalized signal strength probability densities at different elevations. (a) 20°; (b) 40°; (c) 60°

4 结 论

充分考虑实际条件下散射体不同位置的大气环境,结合紫外光通信单次散射链路模型和信号强度对数正态分布,提出了多径散射链路模型。研究结果如下。

1) 臭氧吸收对紫外激光链路性能的影响最大。链路损耗会随着仰角的增加而增大。收发端设置在高度 10 km 以下的链路损耗较小。

2) 将该模型的散射元体积取为散射体的体积,考虑单路径的闪烁效应时,模型退化为原有模型,得到信号强度概率密度分布较为分散。若考虑散射体中多路径叠加的效果,由于经过多次卷积,得到的归一化强度概率密度分布较集中。

3) 在通信距离 100 m 至 1 km,收发端分别位

于 2~14 km 高空处的信道内,因湍流导致闪烁指数在 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 量级内变化,并且当收发端位于高空 11 km 左右闪烁指数存在极大值,而收发端位于 6 km 左右闪烁指数最小。另外,在相同的仿真条件下,通信仰角越大,大气湍流的闪烁效应对紫外激光影响越显著。

因此,无论从闪烁指数方面还是链路损耗方面考虑,在无障碍物遮挡的环境中,使用直视通信可以取得较好性能。本文提出的湍流模型没有考虑大气湿度等影响因素,运算精度还需提高,要得到紫外光高空通信系统性能还需做进一步研究。

参 考 文 献

1 Gang Chen, Zhengyuan Xu, Brian M Sadler. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-

- line-of-sight communication channels[J]. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10500–10509.
- 2 Robert J Drost, Terrence J Moore, Brian M Sadler. Monte-Carlo-based multiple-scattering channel modeling for non-line-of-sight ultraviolet communications [C]. *SPIE*, 2011, 8038: 803802.
 - 3 Dahai Han, Yile Liu, Kai Zhang, *et al.*. Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15833–15842.
 - 4 Gang Chen, Zhengyuan Xu, Brian M Sadler. Experimental demonstration of non-line-of-sight ultraviolet communication channel characteristics[C]. *SPIE*, 2010, 7814: 781407.
 - 5 M A Elshimy, S Hranilovic. Impact of finite receiver-aperture size in a non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(12): 2568–2576.
 - 6 Mohamed A Elshimy, Steve Hranilovic. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries[J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(3): 420–428.
 - 7 Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K Majumdar, *et al.*. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels[C]. *SPIE*, 2011, 8038: 80380J.
 - 8 Houfei Xiao, Yong Zuo, Jian Wu, *et al.*. Bit-error-rate performance of non-line-of-sight UV transmission with spatial diversity reception[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 4143–4145.
 - 9 Ke Xizheng. *Theory of UV Ad Hoc Networks*[M]. Beijing: Science Press, 2011. 7–86.
柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 7–86.
 - 10 Wang Rongyang, Liu Fuhao, Li Xiangyang. Design of BER measurement system for UV communication[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 33(5): 707–710.
王荣阳, 刘福浩, 李向阳. 紫外光通信误码率测试系统设计[J]. *半导体光电*, 2013, 33(5): 707–710.
 - 11 Lü Fengfei, Shi Jun, Peng Guanghui, *et al.*. Research on modulation technology of ultraviolet communication system based on FPGA[J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(1): 45–53.
吕凤飞, 施 军, 彭光辉, 等. 基于FPGA的紫外光调制技术研究[J]. *光电子技术*, 2013, 33(1): 45–53.
 - 12 Hou Qian, Li Xiaoyi, Hou Zhihao, *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.
 - 13 Li Xiaofeng. *The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
 - 14 Earl J McCartney. *Optics of the Atmosphere Scattering by Molecules and Particles* [M]. Pan Naixian, Transl. Beijing: Science Press, 1988. 210–216.
麦卡特尼. 大气光学分子和粒子散射[M]. 潘乃先, 译. 北京: 科学出版社, 1988. 210–216.
 - 15 Jin Qunfeng. *The Influences of Refractive Index of Air*[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006. 48–51.
金群峰. 大气折射率影响因素的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2006. 48–51.
 - 16 Ma Baoke. *Study on the Related Problems of (Light) Beam Propagation in the Atmosphere Turbulence*[D]. Shannxi: Xidian University, 2008.
 - 17 Zheng Yongguang, Chen Luyan, Chen Zunyu, *et al.*. Comparison of characteristics of ozone vertical distribution above Lin'an, Kunming, and Hong Kong during Spring 2001[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(1): 106–109.
郑永光, 陈鲁言, 陈尊裕, 等. 2001年春季临安、昆明和香港臭氧垂直分布特征的对比分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(1): 106–109.

栏目编辑: 王晓球