

# 弱湍流下斜程逆向调制无线光通信性能分析

谢孟桐, 李建华, 徐智勇, 汪井源\*, 赵继勇, 戚艾林, 苏洋, 周华, 沈荟萍

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

**摘要** 针对大气湍流影响下的地-空斜程逆向调制无线光(FSO)通信问题,基于三层高度谱模型对逆向调制斜程链路下的光强闪烁进行研究,推导弱湍流下大气湍流衰落系数的概率密度函数表达式,在此基础上深入研究系统的平均中断概率、平均误码率和平均信道容量,分析天顶角、湍流强度以及接收孔径大小等因素对系统通信性能的影响。研究表明,在低信噪比和长距离通信的情况下,适当增大接收机孔径,地-空斜程逆向调制无线光通信系统依然可以保持较好的通信性能,随着天顶角和近地大气折射率结构常数的减小,湍流对斜程通信链路的影响也有明显减弱。

**关键词** 大气光学; 逆向调制光通信; 大气湍流; 斜程激光通信; 误码率分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1801002

## Performance Analysis for Modulating Retro-Reflector FSO Communications in Weak Turbulent Atmosphere on Slant Path

Xie Mengtong, Li Jianhua, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan\*, Zhao Jiyong,

Qi Ailin, Su Yang, Zhou Hua, Shen Huiping

College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China

**Abstract** Aiming at the problem of ground-space slope reverse modulation wireless optical (FSO) communication under the influence of atmospheric turbulence, the optical intensity scintillation under the reverse modulation slant path link is studied based on the three-layer height spectrum model, and the probability density function expression of the atmospheric turbulence fading coefficient under weak turbulence is derived based on this formula, the average outage probability, average bit error rate and average channel capacity of the system are deeply studied, and the influence of factors such as zenith angle, turbulence intensity and receiving aperture size on the communication performance of the system are analyzed. The research results show that in the case of low signal-to-noise ratio and long-distance communication, the receiver aperture is appropriately increased, and the ground-space reverse modulation slant path wireless optical communication system can still maintain good communication performance. With the decrease of the zenith angle and the refractive index structure constant of the near-earth atmosphere, the influence of turbulence on the slant path communication link is obviously weakened.

**Key words** atmospheric optics; modulating retro-reflector optical communication; atmospheric turbulence; slant path laser communication; bit error rate analysis

**OCIS codes** 010.7060; 010.1330; 200.2605

## 1 引言

自由空间光(Free Space Optical Communications, FSO)通信又称无线光通信,其具有通信容量大、抗

电磁干扰能力强和频谱资源丰富等优势,在航天和军事等领域得到广泛关注<sup>[1]</sup>,FSO系统的收发两端需配备自动瞄准、捕获和跟踪(Pointing, Acquisition and Tracking, PAT)模块以实现光束对

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-02; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61975238)

通信作者: \*wjywjy2011@163.com

准,但增大了终端的质量、体积及成本,限制了无线光通信在一些小型工作平台中的应用。因此,科研人员在此基础上提出了逆向调制 (Modulating Retro-Reflector, MRR) 无线光通信<sup>[2]</sup>。

MRR 无线光通信系统本身链路具有不对称性,系统将发送机和接收机都设置在一端,称为询问端。询问端可分为双基和单基两种结构,当收发装置分开的距离大于菲涅耳半径时,称为双基结构,反之则为单基结构<sup>[3]</sup>。在双基系统中,光束在前、后向链路间传输无相关作用,有利于降低大气湍流带来的影响<sup>[4]</sup>。MRR 无线光通信系统的另一端采用光学反射器和调制器件,即逆向调制端,逆向调制器的反射方向性好,无需配置 PAT 系统,因此具有体积小、质量轻和功耗低的优点,非常适用于无人机、卫星和侦察车等小型工作平台<sup>[5-6]</sup>。

目前,关于采用逆向调制器实现空中小平台对地通信的研究,主要集中于 MRR 器件的研制及系统的实验。2000 年,美国海军研究实验室在无人机上搭载了 InGaAs 量子阱逆向调制器,实现了无人机对地的 MRR 通信实验<sup>[7]</sup>。2014 年,法国空中客车公司也开展了无人机对地的野外试验<sup>[8]</sup>,后又在 Nice Cube 项目中利用 MRR 无线光通信系统完成微型卫星对地面的数据传输<sup>[9]</sup>。2015 年,张鹏等<sup>[10]</sup>提出了一种基于小卫星对地通信的全双工 MRR 通信系统,分析了链路的传输损耗,在不考虑湍流影响的前提下研究了系统的误码性能。

在通信性能方面,研究人员以水平链路为基础进行了深入分析。Yang 等<sup>[11]</sup>采用对数正态分布来模

拟弱湍流下 MRR 无线光通信系统的前、后向链路。李晓燕等<sup>[12-13]</sup>提出一种基于自适应判决门限的 MRR 无线光通信系统,采用双伽马分布研究了系统中到强湍流下的通信性能。El Saghir 等<sup>[14]</sup>采用 M 分布模型分析了双基 MRR 无线光通信系统的性能。基于水平链路的通信性能分析,无需考虑大气湍流随海拔高度的改变,研究结果并不完全适用于地-空斜程链路下的 MRR 系统,对无人机和卫星通信等地-空通信系统的工程设计的参考意义十分有限。

考虑到双基系统中大气湍流对信道的影响更弱,本文针对弱湍流下的斜程 MRR 无线光通信双基传输系统,基于三层高度谱对斜程 MRR 链路的大气闪烁指数进行分析,随后推导信道衰落系数的概率密度函数表达式以及系统的平均误码率、中断概率和平均信道容量,通过数值分析研究天顶角、湍流强度以及接收孔径等因素对系统通信性能的影响以分析系统的可行性,所得结果可为系统设计提供更准确的理论依据。

## 2 斜程链路下逆向调制无线光通信的传输模型

### 2.1 传输模型

斜程链路下 MRR FSO 的传输模型如图 1 所示,其传输模型主要由询问端、大气湍流信道和逆向调制端三部分组成,其中询问端采用的是收发分离的双基结构,从而保证上、下行链路间的独立性,降低湍流影响,逆向调制端采用的是开关键控调制 (OOK) 模块。

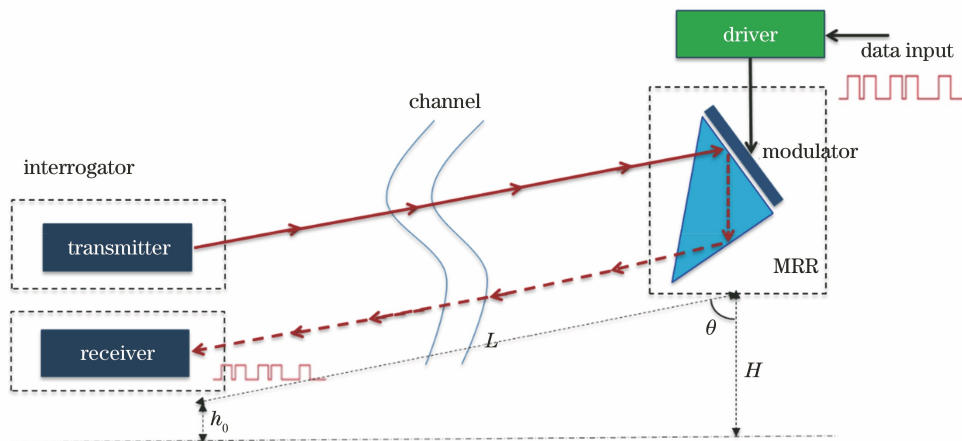


图 1 MRR FSO 的传输模型

Fig. 1 Transmission model of MRR FSO

与地面高度为  $h_0$  的询问端首先将激光器产生的光束发射至高度为  $H$  的逆向调制端,逆向调制端

接收到光信号后,进行 OOK 处理并将调制后的光束发射回询问端,主动接收端的光电检测器再将接

收到的光信号转换为电信号。在考虑湍流的影响下,主动端接收到的电信号  $y$  可表示为<sup>[15]</sup>

$$y = \eta I x + n = \eta u I_0 x + n, \quad (1)$$

式中: $\eta$  表示接收机的光电转换系数; $x$  表示发送电信号,值为 0 或 1; $n$  表示均值为 0 和方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯白噪声; $I$  为归一化接收光强, $I = u I_0$ ;  $I_0$  为发送数据为“1”所对应的信号光强; $u$  为大气湍流造成的衰落系数。MRR FSO 斜程链路包含上、下行链路,所以可以将  $u$  表示为

$$u = u_1 u_2, \quad (2)$$

式中: $u_1$  和  $u_2$  分别表示上、下行链路大气湍流衰落系数,两者相互独立。

通常在斜程大气链路分析中,当天顶角  $\theta \leq 60^\circ$  时,一般认为该信道处于弱湍流环境<sup>[16]</sup>。弱湍流环境下接收光强的衰落特性一般采用对数正态分布来描述,其概率密度函数  $f_{u_i}(u_i)$  ( $i=1,2$ ) 可表示为

$$f_{u_i}(u_i) = \frac{1}{u_i (2\pi\sigma_{\ln I_i}^2)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{(\ln u_i + \sigma_{\ln I_i}^2/2)^2}{2\sigma_{\ln I_i}^2} \right], \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\ln I_i}$  ( $i=1,2$ ) 表示上、下行链路中光信号的对数光强方差。

## 2.2 基于三层高度谱的光强闪烁指数

闪烁指数是衡量大气湍流对激光传输造成影响的重要参数,用来描述光强波动的大小,闪烁指数的定义式为<sup>[17]</sup>

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \quad (4)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$  表示取均值符号; $I = u I_0 = u_1 u_2 I_0$ 。闪

烁指数和对数光强方差的关系为  $\sigma_{\ln I}^2 = \ln(\sigma_I^2 + 1)$ , 弱湍流条件下,闪烁指数近似等于对数光强方差  $\sigma_{\ln I}^2 \cong \sigma_I^2$ 。

基于上、下行链路间的独立性,若将光信号在上、下链路中的传输分开讨论,则上、下行链路闪烁指数  $\sigma_{I_1}^2$  和  $\sigma_{I_2}^2$  的表达式分别为

$$\sigma_{I_1}^2 = \frac{\langle I_1^2 \rangle}{\langle I_1 \rangle^2} - 1 = \frac{\langle u_1^2 I_{01}^2 \rangle}{\langle u_1 I_{01} \rangle^2} - 1 = \frac{\langle u_1^2 \rangle}{\langle u_1 \rangle^2} - 1, \quad (5)$$

$$\sigma_{I_2}^2 = \frac{\langle I_2^2 \rangle}{\langle I_2 \rangle^2} - 1 = \frac{\langle u_2^2 I_{02}^2 \rangle}{\langle u_2 I_{02} \rangle^2} - 1 = \frac{\langle u_2^2 \rangle}{\langle u_2 \rangle^2} - 1, \quad (6)$$

式中: $I_1$  和  $I_2$  分别表示上、下行链路接收端的接收光强; $I_{01}$  和  $I_{02}$  分别表示上、下行链路中发送数据为“1”所对应的信号光强。将(5)式和(6)式与(4)式结合,则 MRR 的闪烁指数可表示为

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle u_1^2 u_2^2 I_0^2 \rangle}{\langle u_1 u_2 I_0 \rangle^2} - 1 = \frac{\langle u_1^2 \rangle \langle u_2^2 \rangle}{\langle u_1 \rangle^2 \langle u_2 \rangle^2} - 1 = (\sigma_{I_1}^2 + 1)(\sigma_{I_2}^2 + 1) - 1. \quad (7)$$

由于斜程链路上大气湍流强度随高度的提升而减弱,为此有学者提出了三层高度谱模型,将大气分为边界层、对流层和平流层三层。其中 1~2 km 高度的边界层用幂律谱指数为 11/3 的 Kolmogorov 谱来描述,对流层和平流层分别用幂律谱指数分别为 10/3 和 5 的非 Kolmogorov 谱来描述<sup>[18]</sup>。基于三层高度谱的下行链路和上行链路的光强闪烁指数的表达式为<sup>[19]</sup>

$$\sigma_{I_1}^2 = -1.30k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{5}{6}} \sec \theta \operatorname{Re} \left[ \int_{h_0}^H i^{-(1-\alpha/2)} \xi^{-(1-\alpha/2)} (1-\theta)^{-(1-\alpha/2)} C_n^2(h) \Gamma(1-\alpha/2) dh \right], \quad (8)$$

$$\sigma_{I_2}^2 = -1.30k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{5}{6}} \sec \theta \operatorname{Re} \left[ \int_{h_0}^H i^{-(1-\alpha/2)} \xi^{-(1-\alpha/2)} C_n^2(h) \Gamma(1-\alpha/2) dh \right], \quad (9)$$

式中: $k$  表示波长为  $\lambda$  的波数, $k = 2\pi/\lambda$ ;  $L$  表示单向斜程链路的传输距离; $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数; $\alpha$  表示幂律谱指数,随海拔高度的变化不断变化; $\xi$  表示归一化的距离变量, $\xi = 1 - (h - h_0)/(H - h_0)$ ,其中  $h$  表示海拔高度; $C_n^2(h)$  表示随海拔高度变化的折射率结构参数,采用 H-V(Hufnagel-Valley)模型来描述<sup>[19]</sup>。

将(8)式和(9)式代入(7)式并进行数值分析,可以得到斜程链路下的闪烁指数,结果如图 2 所

示。其中,1550 nm 是目前国内外无线光通信系统比较常用的波段,透过率较好,后续仿真中工作波长均选用 1550 nm。为了符合高空对地的斜程通信应用场景,选用的通信距离  $L = 10 \sim 80$  km。随着天顶角  $\theta$ 、传输距离  $L$  和近地大气折射率结构常数  $C_n^2(0)$  的增加,光强闪烁指数(SI)增强。从图 2(b)可以看到,增大接收端天线口径  $D$ ,光强闪烁指数有了明显降低,当  $D$  达到 0.1 m 时,在  $L = 50$  km 的情况下,即使增大  $C_n^2(0)$  和天顶角  $\theta$ ,闪

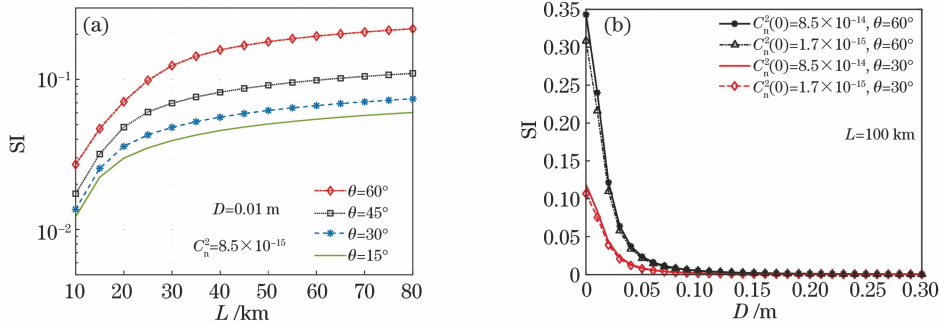


图 2 斜程 MRR 链路下的闪烁指数。(a) 闪烁指数随传输距离的变化关系;(b) 闪烁指数随接收孔径的变化关系  
Fig. 2 Scintillation index on slant MRR link. (a) Relationship between scintillation index and transmission distance;  
(b) relationship between scintillation index and receiving aperture

烁指数仍满足 \$S\_1 \le 0.01\$, 此时湍流对信道的影响较弱, 说明合理增大接收端天线口径对大气湍流的影响具有抑制作用。

### 2.3 MRR FSO 链路衰落的概率密度函数

衰落系数 \$u\$ 的概率密度函数 \$f\_u(u)\$ 可以表示为

$$f_u(u) = \int \frac{1}{u_1} f_{u_1}(u_1) f_{u_2}\left(\frac{u}{u_1}\right) du_1. \quad (10)$$

基于 \$\sigma\_{\ln I\_i}^2 \cong \sigma\_{I\_i}^2\$ (\$i=1, 2\$), 将 (3) 式代入 (10) 式并进行变量代换, 即零点 \$h' = (\ln u\_1 + 0.5\sigma\_{I\_1}^2) \div \sqrt{2}\sigma\_1\$, 可以将 \$f\_u(u)\$ 化简为

$$f_u(u) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma_{I_2}u} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-h'^2) \exp\left\{-\left[\frac{-\sqrt{2}\sigma_{I_1}h' + \ln u + 0.5(\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2)}{\sqrt{2}\sigma_{I_2}}\right]^2\right\} dh' \approx \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma_{I_2}u} \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \exp\left\{-\left[\frac{-\sqrt{2}\sigma_{I_1}h'_{i'} + \ln u + 0.5(\sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2)}{\sqrt{2}\sigma_{I_2}}\right]^2\right\}, \quad (11)$$

式中: \$\{w\_{i'}\}\$ 和 \$\{h'\_{i'}\}\$ (\$i'=1, \dots, n'\$) 分别表示高斯-埃米特多项式 \$R\_{n'}(x) = (-1)^{n'} \exp(x^2) \frac{d^{n'}}{dx^{n'}} \times \exp(x^{-2})\$ 的权重和零点<sup>[20]</sup>, 其中 \$n'\$ 为零点的总个数。\$\{h'\_{i'}\}\$ 可以通过

$$w_{i'} = \frac{2^{n'-1} n'! \sqrt{\pi}}{n'^2 [R_{n'-1}(h'_{i'})]^2} \quad (12)$$

计算得到。当传输距离 \$L = 50\$ km、近地折射率结构常数 \$C\_n^2(0) = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}\$ 和工作波长为 \$1550\$ nm 时, 改变接收孔径 \$D\$ 与天顶角 \$\theta\$, 得到的湍流衰落系数 \$u\$ 与其概率密度函数 \$f\_u(u)\$ 之间的关系如图 3 所示。从图 3 可以看到, 随着天顶角的减小和接收孔径的增大, 归一化的 \$u\$ 更集中于 \$u=1\$ 周围, 表明此时大气湍流对光传输的影响更小。

### 3 斜程链路下逆向调制无线光通信的性能分析

若进行通信性能的分析, 首先需要求取接收信号瞬时信噪比 \$\gamma\$ 的概率密度函数 \$f(\gamma)\$。已知瞬时信噪比 \$\gamma\$ 和平均信噪比 \$\bar{\gamma}\$ 分别为 \$\gamma = (\eta u I\_0)^2 / 2\sigma\_n^2\$

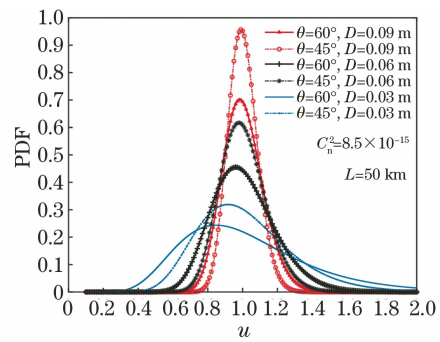


图 3 斜程 MRR 链路下衰落系数的概率密度函数曲线  
Fig. 3 Probability density function curves of fading coefficient under slant MRR link

和 \$\bar{\gamma} = [\eta \langle u \rangle I\_0]^2 / 2\sigma\_n^2\$, 考虑到 \$u\_1\$ 和 \$u\_2\$ 均为归一化的信道衰落系数, 可以得到 \$\gamma = \bar{\gamma} u^2\$, 因此概率密度函数 \$f\_\gamma(\gamma)\$ 可表示为

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi\sigma_{I_2}\gamma} \times \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \exp\left\{-\left[\frac{\ln(\gamma/\bar{\gamma}) - 2\sqrt{2}\sigma_{I_1}h'_{i'} + \sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2}{2\sqrt{2}\sigma_{I_2}}\right]^2\right\}. \quad (13)$$

对(13)式进行积分就可以得到  $\gamma$  的累积分布函数  $F_\gamma(\gamma)$ , 表达式为

$$F_\gamma(\gamma) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \times \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \operatorname{erfc} \left\{ - \left[ \frac{\ln(\gamma/\bar{\gamma}) - 2\sqrt{2}\sigma_{I_1} h'_{i'} + \sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2}{2\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right] \right\}, \quad (14)$$

式中:  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  表示互补误差函数。

### 3.1 中断概率

中断概率是指通信系统接收信号的信噪比低于指定阈值  $\gamma_{\text{th}}$  的概率<sup>[21]</sup>, 计算方式为

$$P_{\text{out}} = P(\gamma \leq \gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_\gamma(\gamma) d\gamma, \quad (15)$$

式中:  $P_{\text{out}}$  表示中断概率。结合(14)式得到累积分布函数  $F_\gamma(\gamma)$ ,  $P_{\text{out}}$  可以表示为

$$\begin{aligned} \bar{P}_e &= \frac{1}{4\sqrt{2}\pi\sigma_{I_2}} \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \operatorname{erfc} \left[ \frac{(1-\epsilon)\sqrt{\gamma}}{2} \right] \exp \left\{ - \left[ \frac{\ln(\gamma/\bar{\gamma}) - 2\sqrt{2}\sigma_{I_1} h'_{i'} + \sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2}{2\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right]^2 \right\} d\gamma = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \exp \left( -\frac{m_{i'}^2}{8\sigma_{I_2}^2} \right) \sum_{j=1}^q A_j \exp \left( \frac{m_{i'} t_j}{\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{(1-\epsilon)\exp(\sqrt{2}\sigma_{I_2} t_j)}{2} \right], \end{aligned} \quad (18)$$

式中:  $m_{i'} = \ln \bar{\gamma} + 2\sqrt{2}\sigma_{I_1} h'_{i'} - \sigma_{I_1}^2 - \sigma_{I_2}^2$ ;  $\{A_j\}$  和  $\{t_j\}$  ( $j=1, \dots, q$ ) 分别表示(18)式求积式中的高斯-埃米特多项式的权重和零点<sup>[20]</sup>, 其中  $q$  表示(18)式求积式中的零点总个数。 $A_j$  值可以通过(12)式计算得到。

### 3.3 平均信道容量

平均信道容量是通信系统能够无错误传送的最

$$P_{\text{out}} = F_\gamma(\gamma_{\text{th}}) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \times \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \operatorname{erfc} \left\{ - \left[ \frac{\ln(\gamma_{\text{th}}/\bar{\gamma}) - 2\sqrt{2}\sigma_{I_1} h'_{i'} + \sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2}{2\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right] \right\}. \quad (16)$$

### 3.2 平均误码率

通常衰落信道下平均误码率  $\bar{P}_e$  的计算可以通过信道的瞬时误码率  $P_e$  与接收信号瞬时信噪比的概率密度函数  $f_\gamma(\gamma)$  相乘求和得到<sup>[22]</sup>, 即

$$\bar{P}_e = \int_0^\infty f_\gamma(\gamma) P_e d\gamma, \quad (17)$$

式中:  $P_e$  表示瞬时误码率,  $P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{(1-\epsilon)\sqrt{\gamma}}{2} \right]$ ,

其中  $\epsilon$  表示消光比。将(13)式代入(17)式, 可以得到平均误码率为

大信息速率<sup>[23]</sup>, 单位为 bit/s, 平均信道容量的计算方式为

$$\bar{C} = \int_0^\infty B \ln(1+\gamma) f(\gamma) d\gamma, \quad (19)$$

式中:  $B$  表示信道带宽。将(13)式代入(19)式, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\bar{C}}{B} &= \frac{1}{2\sqrt{2}\pi\sigma_{I_2}} \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma} \ln(1+\gamma) \exp \left\{ - \left[ \frac{\ln(\gamma/\bar{\gamma}) - 2\sqrt{2}\sigma_{I_1} h'_{i'} + \sigma_{I_1}^2 + \sigma_{I_2}^2}{2\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right]^2 \right\} d\gamma = \\ &= \frac{1}{\pi} \sum_{i'=1}^{n'} w_{i'} \exp \left( -\frac{m_{i'}^2}{8\sigma_{I_2}^2} \right) \sum_{j=1}^l s_{j'} \exp \left( \frac{m_{i'} p_{j'}}{\sqrt{2}\sigma_{I_2}} \right) \ln[1 + \exp(2\sqrt{2}\sigma_{I_2} p_{j'})], \end{aligned} \quad (20)$$

式中:  $\{s_{j'}\}$  和  $\{p_{j'}\}$  ( $j'=1, \dots, l$ ) 分别表示(20)式求积式中的高斯-埃米特多项式的权重和零点<sup>[20]</sup>, 其中  $l$  表示(20)式求积式中的零点总个数。 $s_{j'}$  值可以通过(12)式计算得到。

### 3.4 通信性能分析

数值分析采用的参数如表 1 所示。本文采用(15)式、(17)式和(19)式得到的数值结果来验证 3.1~3.3 节中(16)式、(19)式和(20)式得到的解析结果<sup>[24-25]</sup>。图 4~6 分别为斜程 MRR 链路下的中

断概率、平均误码率和平均信道容量, 其中“numerical”依次代表由(15)式、(17)式和(19)式得到的数值结果, “analytical”依次代表由(16)式、(19)式和(20)式得到的解析结果。从图 4~6 可以看到, 解析和数值结果能够较好的吻合。

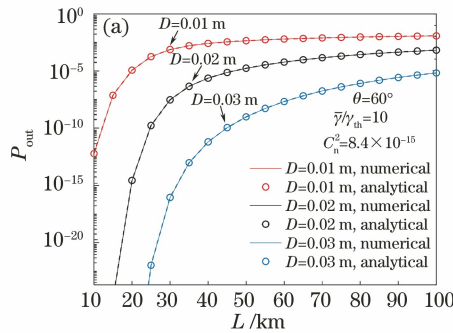
图 4 和图 5 分别给出中断概率  $P_{\text{out}}$  和误码率  $\bar{P}_e$  与传输距离  $L$  和信噪比(SNR)等参数的关系。从图 4 和图 5 可以看到, 当平均信噪比固定时, 随着传输距离的增大, 系统的中断概率和误码率不断增

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Transmitter height / m	0
Wavelength / nm	1550
Receiver aperture diameter / m	0.01, 0.02, 0.03
Refractive-index structure constant / $m^{-2/3}$	$1.7 \times 10^{-14}$ , $8.5 \times 10^{-15}$
Link distance / km	10-100
Signal to noise ratio / dB	0-35
Zenith angle / ( $^\circ$ )	15, 30, 45, 60

大,通信性能逐步劣化。此时将接收端孔径从  $D =$



0.01 m 增大至  $D=0.03$  m,  $P_{out}$  和  $\bar{P}_e$  均有了明显降低。从图 4(a) 可以看到, 当  $\bar{\gamma}/\gamma_{th} = 10$ 、 $D = 0.03$  m、 $\theta = 60^\circ$  和  $L = 60$  km 时, 中断概率  $P_{out} \leq 10^{-9}$ 。从图 5(a) 可以看到, 在  $\bar{\gamma} = 20$  dB、 $D = 0.03$  m、 $\theta = 60^\circ$  和  $L = 60$  km 的情况下, 能够满足  $\bar{P}_e \leq 10^{-6}$ , 中断概率和误码性能较好。从数值分析结果可以看出, 即使在大天顶角、低信噪比和长距离通信的情况下, 适当增大接收机孔径, 斜程 MRR 通信系统依然可以保持较好的通信性能, 此外减小天顶角  $\theta$ 、 $P_{out}$  和  $\bar{P}_e$  也会随之降低。

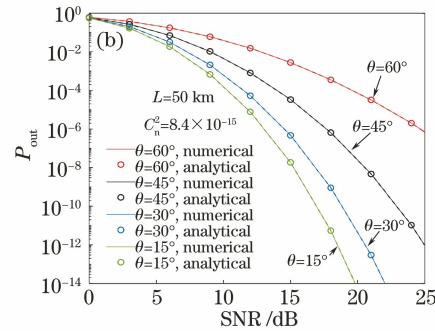


图 4 斜程 MRR 链路下的中断概率。(a) 中断概率随传输距离的变化关系; (b) 中断概率随平均信噪比的变化关系  
Fig. 4 Interrupt probability of slant MRR link. (a) Relationship between interrupt probability and transmission distance; (b) relationship between interrupt probability and average SNR

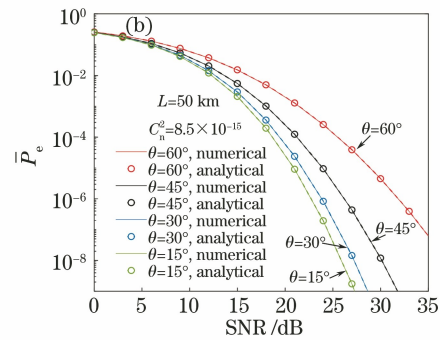
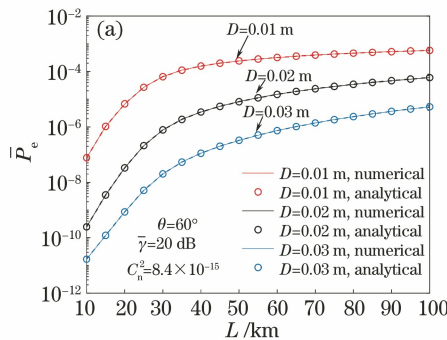


图 5 斜程 MRR 链路下的平均误码率。(a) 误码率随传输距离的变化关系; (b) 误码率随平均信噪比的变化关系  
Fig. 5 Average bit error rate in slant MRR link. (a) Relationship between bit error rate and transmission distance; (b) relationship between bit error rate and average SNR

图 6 为平均信道容量  $\bar{C}$  随平均信噪比  $\bar{\gamma}$ 、接收孔径  $D$ 、传输距离  $L$ 、 $C_n^2(0)$  以及天顶角  $\theta$  等变化的曲线。从图 6 可以看到, 随着  $L$  和天顶角  $\theta$  的增大, 平均信道容量仅有小幅度下降, 而随着接收孔径和平均信噪比  $\bar{\gamma}$  的增大, 信道的平均容量有所提升。通常在分析弱湍流对光通信性能的影响, 一般将白天的近地大气折射率结构常数设为  $1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ , 将夜间的近地大气折射率结构常数设为  $8.5 \times 10^{-15} m^{-2/3}$  [24]。从图 6(b) 可以看出夜间的大气湍流相对较弱, 此时随着  $C_n^2(0)$  值的减小, 平

均信道容量略有提升。此外, 当平均信噪比  $\bar{\gamma}$  从 10 dB 增大到 20 dB 时, 在小孔径接收的情况下,  $\bar{C}/B$  值从  $3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  提升至  $6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$  左右, 说明适当提高  $\bar{\gamma}$  对系统的平均信道容量性能有明显的改善。

## 4 结 论

本文主要分析了弱湍流环境下斜程 MRR 链路的闪烁指数, 并且推导出系统的平均误码率、中断概率和平均信道容量的表达式。数值分析结果表明,

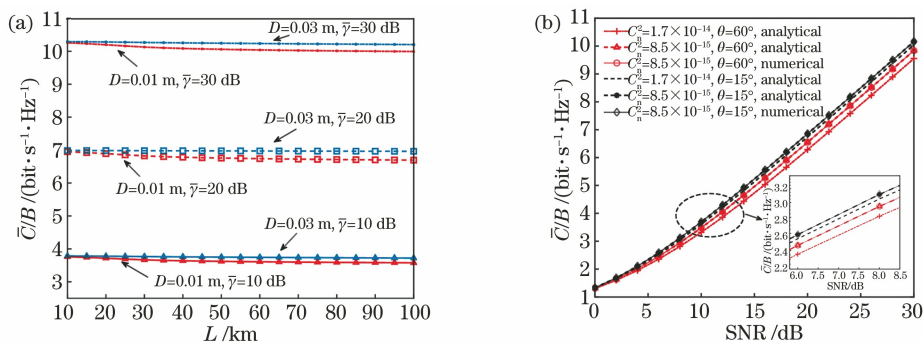


图 6 斜程 MRR 链路下的平均信道容量。(a) 平均信道容量随传输距离的变化关系;  
(b) 平均信道容量随平均信噪比的变化关系

Fig. 6 Average channel capacity over slant MRR link. (a) Relationship between average channel capacity and transmission distance; (b) relationship between average channel capacity and average SNR

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强,光强闪烁指数增大,系统的误码率、中断概率以及平均信道容量也随之下降。另外,通常在传统 FSO 链路中,发射光束的直径大小对光强闪烁也存在一定的影响,关于发射光束的直径大小对斜程逆向调制无线光通信链路的影响还有待深入分析。在实际工程设计中,可以通过适当减小天顶角以及增大接收端天线口径来抑制闪烁以提高系统的通信性能。

### 参 考 文 献

- [1] Kazaura K, Omae K, Suzuki T, et al. Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 4958-4968.
- [2] Scott A M, Ridley K D, Jones D C, et al. Retro-reflective communications over a kilometre range using a MEMS-based optical tag [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7480: 74800L.
- [3] Jia R, Wei H Y, Zhang H J, et al. Scintillation index of echo wave in slant atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1113001. 贾锐, 韦宏艳, 张洪建, 等. 斜程大气湍流中点目标回波的闪烁研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1113001.
- [4] Mahon R, Ferraro M S, Goetz P G, et al. Atmospheric turbulence effects on a monostatic and bistatic retroreflecting link [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9080: 908017.
- [5] Goetz P G, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Modulating retro-reflector lasercom systems for small unmanned vehicles [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(5): 986-992.
- [6] Ren J Y, Sun H Y, Zhang L X. Research on a space microsatellite laser communication method based on

modulating retroreflector technology [M] // Habib K, Lewis E. *Frontier research and innovation in optoelectronics technology and industry*. London: Taylor & Francis Group, 2018: 341-346.

- [7] Goetz P G, Rabinovich W S, Walters R J, et al. Effects of proton irradiation on InGaAs/AlGaAs multiple quantum well modulators [C] // 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 01TH8542), March 10-17, 2001, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2001: 1523-1529.
- [8] Thueux Y, Avlonitis N, Erry G. DAZZLE project: UAV to ground communication system using a laser and a modulated retro-reflector [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9248: 92480P.
- [9] Millour F, Ottogalli S, Maamri M, et al. The Nice Cube (Nice3) nanosatellite project [EB/OL]. (2018-08-29) [2021-05-01]. <https://arxiv.org/abs/1808.09848>.
- [10] Zhang P, Wang T S, Yang G W, et al. Performance evaluation of full-duplex free space laser communication system based on modulating retro-reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2506-2510. 张鹏, 王天枢, 杨国伟, 等. 全双工逆向调制回复空间光通信系统性能评价 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2506-2510.
- [11] Yang G W, Li Z P, Bi M H, et al. Channel modeling and performance analysis of modulating retroreflector FSO systems under weak turbulence conditions [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 16755236.
- [12] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance for modulating retro-reflector free space optical communication system based on adaptive threshold under atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0606001. 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. 大气湍流影响下基于自适应判决门限的逆向调制自由空间光通信系统误码率性

- 能分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0606001.
- [13] Li X Y, Zhao X H, Zhang P. Bit error rate analysis for modulating retro-reflector free space optical communications with adaptive threshold over correlated gamma gamma fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2275-2278.
- [14] El Saghir B M, El Mashade M B, Aboshosha A M. Performance analysis of modulating retro-reflector FSO communication systems over Málaga turbulence channels[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126160.
- [15] Sandalidis H G, Tsiftsis T A. Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence[J]. Electronics Letters, 2008, 44(1): 46-47.
- [16] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005: 230-255.
- [17] Yang R K, Chen Y, Hou J, et al. BER of Gaussian beam propagation in non-Kolmogorov turbulent atmosphere on slant path[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8906: 890625.
- [18] Yi X, Liu Z J, Yue P. Uplink laser satellite-communication system performance for a Gaussian beam propagating through three-layer altitude spectrum of weak-turbulence[J]. Optik, 2013, 124(17): 2916-2919.
- [19] Ji Y, Yue P, Yan R Q, et al. BER performance analysis of the atmospheric laser communication system on the slant path in weak turbulence [J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(1): 66-70.  
姬瑶, 岳鹏, 闫瑞青, 等. 弱湍流下斜程大气激光通信误码率分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(1): 66-70.
- [20] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical recipes in C: the art of scientific computing [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [21] Wu Y, Mei H P, Wei H L. Performance analysis of free-space optical communication system under joint channel conditions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050101.  
吴琰, 梅海平, 魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050101.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Nistazakis H E, Tsiftsis T A, Tombras G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels [J]. IET Communications, 2009, 3(8): 1402-1409.
- [25] García-Zambrana A, Castillo-Vázquez C, Castillo-Vázquez B. On the capacity of FSO links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels using OOK signaling [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, 2010: 127657.