

# 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析

吴琰<sup>1,2,3</sup>, 梅海平<sup>1</sup>, 魏合理<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

<sup>3</sup>淮南师范学院电子工程学院, 安徽 淮南 232038

**摘要** 大气环境严重影响了自由空间光通信系统的性能。考虑到天气环境、大气湍流以及指向性误差等因素对激光通信的影响,建立了联合信道统计模型,并利用 Meijer-G 函数推导出基于开关键控调制的自由空间光通信系统的平均误码率、平均信道容量和中断概率等性能参数及其闭合表达式。在不同类型的 M 湍流、不同的归一化指向性误差以及能见度为 5 km 和 20 km 天气的联合信道条件下,对系统性能参数进行仿真与分析。结果表明:指向性误差越小,通信系统性能参数受湍流影响越大;指向性误差越大,越可能存在最佳光束发散角使得通信系统达到最佳性能。

**关键词** 自由空间光通信; 联合信道; M 湍流; 平均误码率; 平均信道容量; 中断概率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050101

## Performance Analysis of Free-Space Optical Communication System under Joint Channel Conditions

Wu Yan<sup>1,2,3</sup>, Mei Haiping<sup>1,2</sup>, Wei Heli<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optical, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>3</sup>School of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China

**Abstract** The atmospheric environment seriously affects performance of the free space optical communication system. Considering the influence of weather environment, atmospheric turbulence and directivity error on laser communication, we establish a joint channel statistical model, and derive the performance parameters of free space optical communication system based on on-off keying modulation, such as average bit error rate, average channel capacity and outage probability and their closed expressions, using Meijer-G function. The performance parameters of the system are simulated and analyzed under different M turbulences, different normalized pointing errors and visibilities of 5 km and 20 km. The results show that the smaller the directivity error, the greater the influence of turbulence on the performance parameters of the communication systems; the bigger the directivity error, the more likely for a best beam divergence angle existing to make the communication system achieve the best performance.

**Key words** free space optical communication; joint channel; M turbulence; average bit error rate; average channel capacity; outage probability

**OCIS codes** 010.1110; 010.3310; 060.2605; 060.4510

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-04; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 安徽省教育厅 2018 年度高校科学研究项目重点项目(KJ2018A0464)

\* E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>  
050101-1

## 1 引言

自由空间光(FSO)通信是一种以激光为信息载体,在视线无遮挡的大气信道中进行点对点传输的无线通信技术。FSO通信系统结合了微波通信和光纤通信优点,具有传输容量大、建网速度快,无需授权、保密性好等特点,通常用作电信“最后一公里”或者楼宇之间局域网(LAN)链路<sup>[1-4]</sup>。

FSO通信系统的性能受到光束扩展、指向性误差、湍流以及大气环境等因素的严重影响。Sandalidis等<sup>[5]</sup>利用K湍流模型与指向性误差模型,分析了基于开关键控(OOK)调制的强度调制/直接检测(IM/DD)FSO通信系统的误码率性能;Liu等<sup>[6]</sup>利用Gamma-Gamma湍流模型与指向性误差模型,对FSO通信系统信道容量进行了分析和仿真;Farid等<sup>[7-8]</sup>建立Gamma-Gamma湍流和指向性误差联合信道模型,并分析了FSO通信系统的性能。

近年来,一种描述湍流的新广义统计模型即M湍流被提出<sup>[9]</sup>。Jurado-Navas等<sup>[10]</sup>利用M湍流模型与指向性误差模型,分析讨论了FSO通信系统的平均误码率性能;Ansari等<sup>[11]</sup>利用M湍流模型与指向性误差模型,重点分析了平均误码率、遍历容量以及中断概率等系统性能参数;López-González等<sup>[12]</sup>基于M湍流提出了一种新的平均误码率推导方法,并分析了FSO通信系统的平均误码率性能;Alheadary等<sup>[13]</sup>利用M湍流模型、指向性误差模型和Meijer-G函数,推导并分析了FSO通信系统的平均误码率闭合解析式;Vellakudiyan等<sup>[14]</sup>利用M湍流模型、指向性误差模型和Meijer-G函数,推导了混合射频/自由空间光(RF/FSO)通信系统的遍历信道容量闭合解析式;Ansari等<sup>[15]</sup>利用M湍流模型、指向性误差模型和Meijer-G函数,分析得到了非对称混合RF/FSO通信系统的中断概率闭合解析式。

本文首先建立了雾、M湍流、指向性误差的联合信道模型;然后结合Meijer-G函数,推导出OOK调制的IM/DDFSO通信系统的平均误码率、平均信道容量、中断概率的闭合解析式;最后,仿真分析了不同条件下平均误码率、平均信道容量、中断概率等系统性能参数随信噪比(RSN)和光束发散角的变化情况。

## 2 系统与信道模型

实际FSO通信系统均采用OOK方案的强度

调制/直接检测方式。输出信号 $y$ 为<sup>[7]</sup>

$$y = hRx + n, \quad (1)$$

式中, $x$ 为发射信号, $x \in \{0, 2P_t\}$ , $P_t$ 为平均发射光功率, $n$ 为加性高斯白噪声(方差为 $\sigma_n^2$ ), $R$ 为探测器灵敏度(A/W), $h$ 为信道状态。信道状态与天气条件、大气湍流以及指向误差等有关,且这些因素互不相关, $h$ 可表示为<sup>[7]</sup>

$$h = h_1 h_a h_p, \quad (2)$$

式中, $h_1$ 为受天气条件影响的路径损耗, $h_a$ 为受大气湍流影响的路径损耗, $h_p$ 为受指向误差影响的路径损耗。

### 2.1 大气信道衰减

FSO通信系统中大气信道含有的雾、霾、气溶胶等空气悬浮物,会对激光通信系统性能产生影响。根据Beer-Lambert定律的描述<sup>[4]</sup>,受不同天气影响的路径损耗为

$$h_1 = T_a(\lambda, L) = \exp(-\sigma L), \quad (3)$$

式中, $T_a(\lambda, L)$ 为大气透过率, $L$ 为大气信道的长度, $\sigma$ 为大气衰减系数。当对比感阈为0.02时,大气衰减系数 $\sigma$ 与能见度 $V$ 的关系可表示为<sup>[16]</sup>

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q}, \quad (4)$$

式中, $V$ 为能见度(km), $\lambda$ 为激光波长(nm), $q$ 为波长修正因子。由Kim模型可知<sup>[16]</sup>

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \\ 1.3, & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34, & 1 < V < 6. \\ V - 0.5, & 0.5 < V < 1 \\ 0, & V < 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 M湍流模型

M湍流模型是一种物理模型,在接收机的观测域内接收光信号由三个部分组成<sup>[10]</sup>:视线分量(LOS component) $U_L$ ;在与视线分量相耦合的传播轴(同轴)上,由涡旋引起的准前向散射分量 $U_S^C$ ;由离轴路径上漩涡对光能量产生的独立散射分量 $U_S^G$ ,其与前两个分量统计独立。根据文献[11-12], $h_a$ 的概率密度函数为

$$f_{h_a}(h_a) = A \sum_{m=1}^{\beta} a_m h_a^{\frac{\alpha+m}{2}-1} K_{\alpha-m} \left( 2 \sqrt{\frac{\alpha \beta h_a}{g\beta + \Omega'}} \right), \quad h_a > 0, \quad (6)$$

式中

$$A = \frac{2\alpha^{\alpha/2}}{g^{1+\alpha/2} \Gamma(\alpha)} \left( \frac{g\beta}{g\beta + \Omega'} \right)^{\beta+\alpha/2}, \quad (7)$$

$$a_m = \binom{\beta-1}{m-1} \frac{(g\beta + \Omega')^{1-m/2}}{(m-1)!} \left( \frac{\Omega'}{g} \right)^{m-1} \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{m/2}, \quad (8)$$

式中,  $m$  为求和符号  $\Sigma$  的变量,  $\alpha$  为一个正参数, 与散射过程中大尺度涡旋的有效数目有关,  $\beta$  为衰弱参数的值(自然数), 与小尺度涡流产生的衍射效应有关,  $g = E(|U_S^G|^2) = 2b_0(1-\rho)$  为离轴涡旋路径接收到独立散射分量的平均功率,  $2b_0 = E(|U_S^G|^2 + |U_S^C|^2)$  为总散射分量的平均功率, 参数  $0 \leq \rho \leq 1$  为与视线分量耦合的散射功率值, 相互耦合分量的平均功率  $\Omega' = \Omega + 2b_0\rho + 2\sqrt{2b_0\rho\Omega} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$ ,  $\Omega = E(|U_L|^2)$  为视线分量的平均功率,  $\varphi_A$  和  $\varphi_B$  分别为视线分量和同轴分量各自的确定相位,  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数,  $K_{\alpha-m}(\cdot)$  为第二类  $\alpha - m$  阶修正 Bessel 函数。值得注意的是  $E(|U_S^C|^2) = 2b_0\rho$  表示与 LOS 分量相耦合的同轴分量的平均功率, 则平均光强为  $E[I] = \Omega + 2b_0$ 。

### 2.3 指向性误差

Farid 等<sup>[7]</sup> 假设在垂直和水平两个方向上, 指向误差的抖动相互独立且完全同。指向误差的抖动可用期望为 0 且方差为  $\sigma_s^2$  的高斯分布表示。接收到的激光光束的径向位移(偏离圆形接收机孔径中心)用 Rayleigh 分布来表示。因此, 得到指向误差损耗  $h_p$  的概率密度函数为<sup>[7]</sup>

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^2} h_p^{\gamma^2-1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (9)$$

式中,  $\gamma = \omega_e/2\sigma_s$  为在接收机上等效光束半径与指向误差抖动的标准差之比,  $\omega_e^2 = \omega_L^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v)/[2v \exp(-v^2)]$ ,  $\omega_L$  为距离光源  $L$  处的束腰半径,  $A_0 = [\operatorname{erfc}(v)]^2$  为无指向误差情况下接收到光功率的分数,  $v = (\sqrt{\pi} d_r)/(\sqrt{2} \omega_L)$ ,  $d_r$  为接收机平面的半径,  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数,  $\theta = 2\omega_L/L$  为发散角  $\theta$  和距离光源  $L$  处的光束腰之间的关系。

### 2.4 联合信道模型

信道状态  $h$  的概率密度(pdf)联合了大气环境  $h_1$ 、湍流  $h_a$  以及指向误差  $h_p$  等影响, 可表示为<sup>[7]</sup>

$$f_h(h) = \int f_{h|h_a}(h|h_a) f_a(h_a) dh_a, \quad (10)$$

式中,  $f_{h|h_a}(h|h_a)$  为给定湍流状态  $h_a$  情况下的条件概率, 联立(9)式, 可得

$$f_{h|h_a}(h|h_a) = \frac{1}{h_a h_1} f_p\left(\frac{h}{h_a h_1}\right) = \frac{\gamma^2}{A_0 h_a h_1} \left(\frac{h}{h_a h_1}\right)^{\gamma^2-1}, \quad 0 \leq h \leq A_0 h_a h_1. \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式得

$$f_h(h) = \frac{\gamma^2}{(A_0 h_1)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \int_{h/A_0 h_1}^{\infty} h_a^{-\gamma^2} f_{h_a}(h_a) dh_a. \quad (12)$$

将(6)式代入(12)式得

$$f_h(h) = \frac{\gamma^2}{(A_0 h_1)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \int_{h/A_0 h_1}^{\infty} h_a^{-\gamma^2} A \sum_{m=1}^{\beta} a_m h_a^{\frac{\alpha+m}{2}-1} K_{\alpha-m}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta h_a}{g\beta + \Omega'}}\right) dh_a = \frac{A\gamma^2}{(A_0 h_1)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \int_{h/A_0 h_1}^{\infty} h_a^{\frac{\alpha+m}{2}-1-\gamma^2} K_{\alpha-m}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta h_a}{g\beta + \Omega'}}\right) dh_a. \quad (13)$$

第二类修正 Bessel 函数  $K_{\alpha-m}(\cdot)$  可以用 Meijer-G 函数的一种特殊情况表示为

$$G_{0,2}^{2,0}(x|a,b) = 2x^{(a+b)/2} K_{a-b}(2\sqrt{x}). \quad (14)$$

令  $a = -b = (\alpha - m)/2$ , 并将(14)式代入(13)式可得

$$f_h(h) = \frac{A\gamma^2}{2(A_0 h_1)^{\gamma^2}} h^{\gamma^2-1} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \int_{h/A_0 h_1}^{\infty} h_a^{\frac{\alpha+m}{2}-1-\gamma^2} \times G_{0,2}^{2,0}\left(\frac{\alpha\beta h_a}{g\beta + \Omega'} \middle| \frac{\alpha-m}{2}, -\frac{\alpha-m}{2}\right) dh_a. \quad (15)$$

利用文献[17]中公式(07.34.21.0085.01)对(15)式进行变换, 得到信道状态  $h$  的概率密度函数  $f_h(h)$  的闭合表达式为

$$f_h(h) = \frac{A\gamma^2}{2} h^{-1} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \left(\frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'}\right)^{-\frac{\alpha+m}{2}} \times$$

$$G_{1,3}^{3,0}\left(\frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'} \frac{h}{h_1 A_0} \middle| \gamma^2 + 1\right) \left(\gamma^2, \alpha, m\right). \quad (16)$$

## 3 FSO 系统性能分析

### 3.1 平均误码率

采用 OOK 调制的 IM/DD 通信系统的误码率模型为

$$P_b(e) = p(1)p(e|1) + p(0)p(e|0), \quad (17)$$

式中,  $p(1)$  和  $p(0)$  分别为发送 1 和 0 比特的概率,  $p(e|1)$  和  $p(e|0)$  分别为发送 1 和 0 比特条件下的错误概率。考虑到  $p(1) = p(0) = 1/2$  且  $p(e|1) = p(e|0)$ , 则关于信道  $h$  条件下的错误概率为<sup>[5]</sup>

$$P_b(e|h) = p(e|1, h) = p(e|0, h) = Q\left(\frac{\sqrt{2} P_t h R}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{P_t h R}{\sigma_n}\right), \quad (18)$$

式中,  $Q(\cdot)$  为 Gaussian-Q 函数, 与误差补函数的关系满足  $\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ , 其中  $x$  为函数变量。

根据  $\text{erfc}(\cdot)$  与 Meijer-G 函数的关系,  $\text{erfc}(\sqrt{x}) =$

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[ x \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right], \text{ 则有}$$

$$P_b(e|h) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{P_t h R}{\sigma_n} \right) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[ \left( \frac{P_t h R}{\sigma_n} \right)^2 \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right]. \quad (19)$$

平均误码率 (BER) 为错误概率在信道状态  $h$  上的平均, 即

$$P_b(e) = \int_0^\infty f_h(h) P_b(e|h) dh. \quad (20)$$

将(16)式和(19)式代入到(20)式中可得

$$P_b(e) = \frac{A\gamma^2}{4\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \left( \frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+m}{2}} \times \int_0^\infty h^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'} \frac{h}{h_1 A_0} \left| \begin{matrix} \gamma^2 + 1 \\ \gamma^2, \alpha, m \end{matrix} \right. \right] \times G_{1,2}^{2,0} \left[ \left( \frac{P_t h R}{\sigma_n} \right)^2 \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right] dh. \quad (21)$$

利用文献[17]中的公式(07.34.21.0013.01)对(21)式进行变换, 得到平均误码率的闭合表达式为

$$P_b(e) = \frac{2^\alpha A \gamma^2 \xi^{\frac{\alpha}{2}}}{32\pi\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\beta} 2^m a_m \xi^{\frac{m}{2}} G_{7,4}^{2,6} \left[ 16A_0^2 \xi^2 \eta^2 \left| \begin{matrix} \frac{1-\gamma^2}{2}, \frac{2-\gamma^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-m}{2}, \frac{2-m}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, -\frac{\gamma^2}{2}, \frac{1-\gamma^2}{2} \end{matrix} \right. \right], \quad (22)$$

式中,  $\xi = \frac{g\beta + \Omega'}{\alpha\beta}, \eta = \frac{P_t h_1 R}{\sigma_n}$ .

### 3.2 平均信道容量

信道容量定义为发射机和接收机可靠通信的最大可达数据率, 是一个随机变量。文献[6]将平均信道容量定义为

$$C = \int_0^\infty B \log_2 [1 + R_{SN}(h)] f_h(h) dh, \quad (23)$$

式中,  $B$  为带宽, FSO 通信系统接收到的瞬时电信噪比<sup>[7]</sup>为  $R_{SN}(h) = h^2 R_{SN}$ , 且平均信噪比  $R_{SN} = 2P_t^2 R^2 / \sigma_n^2$ , 利用对数函数与 Meijer-G 函数的关系,

$\log_2(1+x) = \frac{1}{\ln 2} G_{2,2}^{1,2} \left( x \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right)$ , 将(16)式代入(23)

式中, 可得

$$C = \frac{BA\gamma^2}{2\ln 2} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \left( \frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+m}{2}} \int_0^\infty h^{-1} G_{1,3}^{3,0} \times \left[ \frac{\alpha\beta}{g\beta + \Omega'} \frac{h}{h_1 A_0} \left| \begin{matrix} \gamma^2 + 1 \\ \gamma^2, \alpha, m \end{matrix} \right. \right] G_{2,2}^{1,2} \left( \frac{2P_t^2 h^2 R^2}{\sigma_n^2} \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) dh. \quad (24)$$

利用文献[17]中的公式(07.34.21.0013.01)对(24)式进行变换, 得到平均信道容量的闭合表达式为

$$C = \frac{2^\alpha AB\gamma^2 \xi^{\frac{\alpha}{2}}}{16\pi\ln 2} \sum_{m=1}^{\beta} 2^m a_m \xi^{\frac{m}{2}} G_{8,4}^{1,8} \left[ 32A_0^2 \xi^2 \eta^2 \left| \begin{matrix} 1, 1, \frac{1-\gamma^2}{2}, \frac{2-\gamma^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-m}{2}, \frac{2-m}{2} \\ 1, 0, -\frac{\gamma^2}{2}, \frac{1-\gamma^2}{2} \end{matrix} \right. \right]. \quad (25)$$

### 3.3 中断概率

中断概率为系统误码率大于指定误码率的概率, 或者系统的信噪比低于指定信噪比阈值时的概率, 因此瞬时信噪比  $R_{SN}(h)$ 、阈值  $\mu_{th}$  的大小对系统中断概率有决定性影响。中断概率表达式为<sup>[8,18]</sup>

$$P_{out} = P(R_{SN}(h) \leq M_{th}) = P\left(\frac{2P_t^2 h^2 R^2}{\sigma_n^2} \leq \mu_{th}\right) =$$

$$P(h \leq \sqrt{\frac{\mu_{th} \sigma_n^2}{2P_t^2 R^2}}) = \int_0^U f_h(h) dh, \quad (26)$$

式中  $U = \sqrt{\frac{\mu_{th} \sigma_n^2}{2P_t^2 R^2}} = \sqrt{\frac{\mu_{th}}{R_{SN}}}$  为归一化判决阈值。将

(16)式代入(26)式可得

$$P_{out} = \frac{A\gamma^2}{2} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \xi^{\frac{\alpha+m}{2}} \int_0^U h^{-1} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{h}{\xi h_1 A_0} \left| \begin{matrix} \gamma^2 + 1 \\ \gamma^2, \alpha, m \end{matrix} \right. \right] dh. \quad (27)$$

利用文献[17]中的公式(07.34.21.0084.01)对(27)式进行变换, 得到中断概率的闭合表达式为

$$P_{out} = \frac{A\gamma^2 \xi^{\frac{\alpha}{2}}}{2} \sum_{m=1}^{\beta} a_m \xi^{\frac{m}{2}} G_{2,4}^{3,1} \left[ \frac{U}{\xi h_1 A_0} \left| \begin{matrix} 1, \gamma^2 + 1 \\ \gamma^2, \alpha, m, 0 \end{matrix} \right. \right]. \quad (28)$$

### 4 FSO 系统仿真分析

建立了运行波长为 1550 nm、长度为 1 km 的地面 FSO 通信链路,考察不同天气条件下受指向误差和湍流影响的误码率、系统容量、中断概率等系统性能。由文献[10]可知,实测清晨(上午 06:45)、中午(正午)、午夜(上午 01:00)大气折射率结构常数  $C_n^2$  分别为  $1.2 \times 10^{-14}$ 、 $2.8 \times 10^{-14}$ 、 $7.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。利用折射结构常数可以求出 Rytov 方差  $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k_w^{7/6} L^{11/6}$ , 分别为  $\sigma_R^2 \approx 0.52$ 、 $\sigma_R^2 \approx 1.2$ 、 $\sigma_R^2 \approx 0.32$ , 这里  $k_w = 2\pi/\lambda$  为波数。与不同时段湍流强度的 Rytov 方差相对应, M 湍流模型中的参数<sup>[10]</sup>分别为  $(\alpha = 10; \beta = 5; \rho = 0.75)$ 、 $(\alpha = 10; \beta = 5; \rho = 0.25)$ 、 $(\alpha = 10; \beta = 5; \rho \rightarrow 1)$ , 近似 Gamma-Gamma 分布, 且  $\Omega = 0.5$ 、 $b_0 = 0.25$ 、 $\varphi_A - \varphi_B = \pi/2$ 。选择接收机平面半径  $d_r$  为 5 cm, 光束发散角  $\theta = 2 \times 10^{-4} \text{ rad}$ , 晴天大气溶胶作为天气因素能见度为 20 km, 湍流强度分别选择清晨、正午和午夜, 抖动标准差  $\sigma_s/d_r$  分别选择 1 和 2, 仿真得到平均误码率 BER、平均信道容量  $(C/B)$  和中断概率 (Outage probability) 与信噪比  $R_{SN}$  (或归一化判决阈值  $U$ ) 之间的关系 (图 1、图 3、图 5); 选择激光发射功率  $P_t = 10 \text{ mW}$ , 探测器灵敏度  $R = 0.9 \text{ A/W}$ , 加性高斯白噪声的方差  $\sigma_n^2 = 10^{-14}$  (或归一化判决阈值  $U = -30 \text{ dB}$ ); 选择午夜时的湍流强度, 抖动标准差  $\sigma_s/d_r$  分别选择 1、2 和 4, 能见度分别选择 20 km 和 5 km 时, 通过仿真得到平均误码率 BER、平均信道容量  $(C/B)$  和中断概率与光束发散角  $\theta$  之间的关系 (图 2, 图 4, 图 6)。

在大气能见度为 20 km 的条件下 (图 1), 抖动标准差  $\sigma_s/d_r$  为 1 时, 误码率受湍流强度影响明显, 随着湍流强度的减小, 误码率也随之减小, 午夜时的湍流强度最小, 误码率小于  $10^{-6}$ 。当抖动标准差  $\sigma_s/d_r$  为 2 时, 此时最小误码率在  $10^{-2}$  左右, 随着湍流强度的减小, 误码率也减小, 但差异不大。由图 2 可以看出, 当系统参数不变时, 随着光束发散角的变化 ( $0.05 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ), 误码率也随之变化; 当  $\sigma_s/d_r$  为 1 时, 光束发散角不存在极值, 光束发散角越小则误码率越低; 当  $\sigma_s/d_r$  为 2, 光束发散角大于  $0.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  时, 存在极小值点,  $\theta = 0.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$  时误码率达到最小  $10^{-10}$ ; 当  $\sigma_s/d_r$  为 4, 光束发散角大于  $0.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  时, 存在极小值点,  $\theta = 0.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$  时误码率达到最小值, 约为  $10^{-9}$ 。同时发现能见度对 BER 曲线的影响不大, 且在其他参数不变的情况下, 不同能见度的曲线变化基本一致;

$\sigma_s/d_r$  的变化对曲线的变化和极值点影响较大,  $\sigma_s/d_r$  越大, 误码率为极值点时的  $\theta$  值越大。

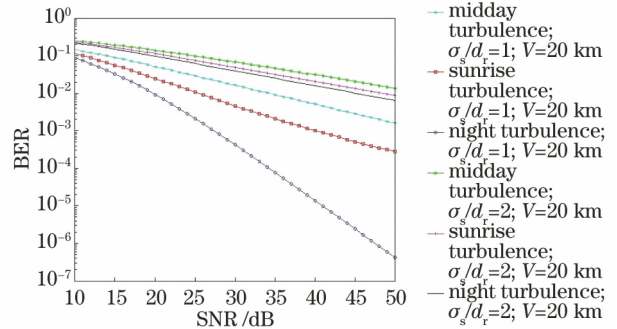


图 1 不同条件下平均误码率随信噪比的变化

Fig. 1 Change of average BER with SNR under different conditions

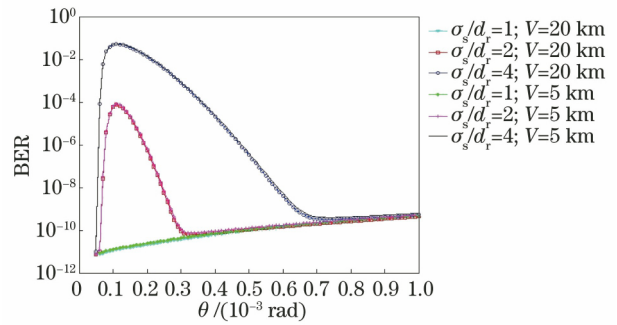


图 2 不同条件下平均误码率随光束发散角的变化

Fig. 2 Change of average bit error rate with divergence angle of light beam under different conditions

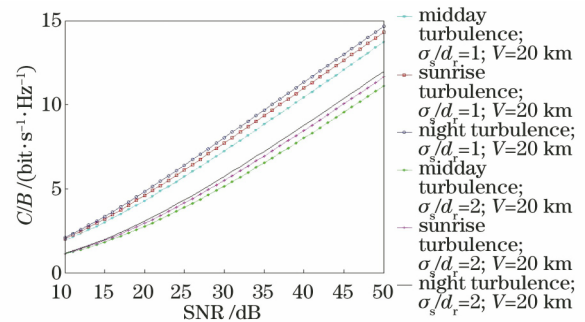


图 3 不同条件下平均信道容量 C/B 随信噪比的变化

Fig. 3 Change of average channel capacity C/B with SNR under different conditions

在大气能见度为 20 km 的条件下 (图 3), 随着信噪比 SNR 的增加, 平均信道容量  $C/B$  也会明显增加; 抖动标准差  $\sigma_s/d_r$  的变化对平均信道容量的影响较大, 湍流强度变化则对  $C/B$  影响不大;  $\sigma_s/d_r = 1$ , 最大信噪比为 50 dB 且午夜湍流时,  $C/B$  最大能达到 15 bit/(s · Hz);  $\sigma_s/d_r = 2$ , 最大信噪比为 50 dB 且正午湍流时,  $C/B$  最大能达到 12 bit/(s · Hz)。由图 4 可以看出, 当系统参数不

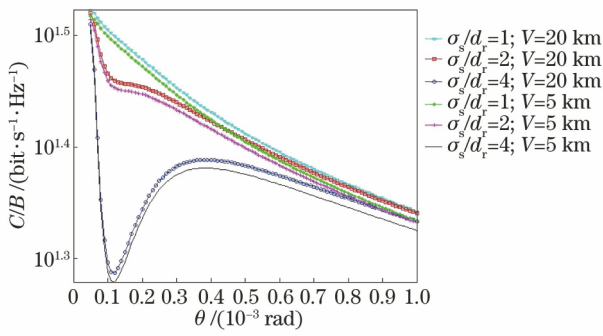


图 4 不同条件下平均信道容量  $C/B$  随光束发散的变化  
Fig. 4 Variation of average channel capacity  $C/B$  with beam divergence under different conditions

变时,随着光束发散角的变化( $0.05 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$  rad),平均信道容量也随之变化;当  $\sigma_s/d_r$  为 1 时,光束发散角不存在极值,光束发散角越小则  $C/B$  越大;当  $\sigma_s/d_r$  为 2 时,光束发散角不存在极值,光束发散角越小则  $C/B$  越大,但光束发散角在  $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.2 \times 10^{-3}$  rad 范围内,存在平稳区;当  $\sigma_s/d_r$  为 4,光束发散角在  $0.05 \times 10^{-3}$  rad 至  $0.2 \times 10^{-3}$  rad 间取值时, $C/B$  存在极小值点,而当光束发散角在  $0.2 \times 10^{-3}$  rad 至 1 rad 间取值时, $C/B$  存在极大值点,即  $\theta = 0.35 \times 10^{-3}$  rad 时  $C/B$  约为  $10^{1.39}$  bit/(s · Hz)。从图 4 还可以看出能见度对该曲线的影响不大,且在其他参数不变的情况下,不同能见度的曲线差异较小且变化趋势一致,  $\sigma_s/d_r$  越小,  $C/B$  的值越大。

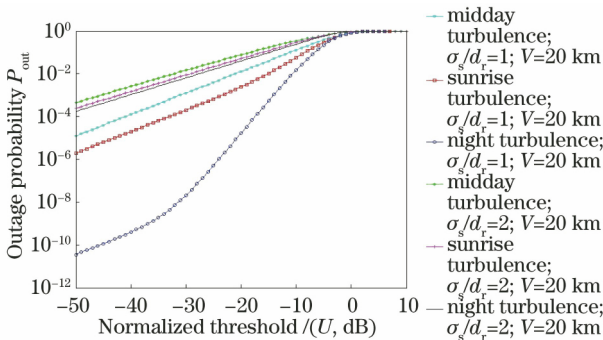


图 5 不同条件下中断概率随归一化判决阈值的关系  
Fig. 5 Relationship between interruption probability and normalized decision threshold under different conditions

在大气能见度为 20 km 的条件下(图 5),随着归一化判决阈值  $U$  的增加,中断概率也会明显增加,当  $U$  为 0 时,中断概率达到 1;当  $\sigma_s/d_r = 1$  时,湍流强度对中断概率的影响非常明显,而当  $\sigma_s/d_r$  增大为 2 时,湍流强度对中断概率的影响较小,且随着湍流强度的增加,中断概率增大。由图 6 可以看出,当系统参数不变时,随着光束发散角的变化

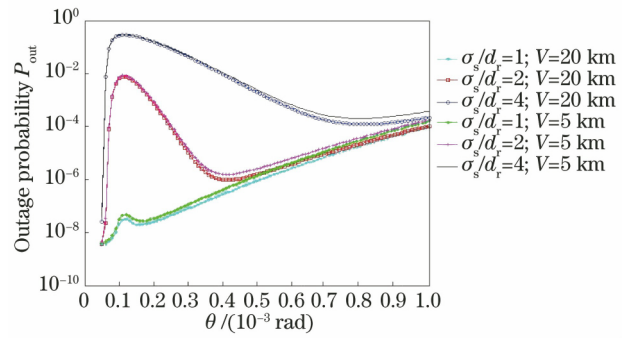


图 6 不同条件下中断概率随光束发散角的关系  
Fig. 6 Relationship between interruption probability and divergence angle of light beam under different conditions

( $0.05 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$  rad),中断概率也随之变化;当光束发散角在  $0.05 \times 10^{-3}$  rad 至  $0.15 \times 10^{-3}$  rad 间取值时,对于不同的  $\sigma_s/d_r$ ,中断概率均存在极大值点;当光束发散角在  $0.15 \times 10^{-3}$  rad 至 1 rad 间取值时,对于不同的  $\sigma_s/d_r$ ,中断概率曲线均存在极小值点。当  $\sigma_s/d_r$  为 1 且  $\theta = 0.16 \times 10^{-3}$  rad 时中断概率达到极小值约为  $10^{-7.8}$ ,当  $\sigma_s/d_r$  为 2 且  $\theta = 0.4 \times 10^{-3}$  rad 时中断概率达到极小值约为  $10^{-6}$ ,当  $\sigma_s/d_r$  为 4 且  $\theta = 0.8 \times 10^{-3}$  rad 时中断概率达到极小值约为  $10^{-4}$ 。从图 6 中还可以看出能见度对该曲线的影响不大,且在其他参数不变的情况下,不同能见度的曲线差异较小且变化趋势一致;  $\sigma_s/d_r$  值越小,中断概率越小,且中断概率为极小值时的  $\theta$  值越小。

## 5 结 论

通过天气因素、M 湍流以及指向性误差建立联合信道模型,并利用 Meijer-G 函数推导出了 FSO 通信系统的平均误码率、平均信道容量、中断概率等性能参数的闭合解析式。仿真发现,在抖动标准差较小时,不同湍流强度对通信系统的各性能参数影响较大;而抖动标准差较大时,不同湍流强度对通信系统的各性能参数影响较小。光束发散角大于  $0.15 \times 10^{-3}$  rad 时,对不同的  $\sigma_s/d_r$  值,中断概率均有极小值点,且  $\sigma_s/d_r$  值越大,极值点对应的光束发散角越大;当  $\sigma_s/d_r = 4$  时,平均信道容量才存在极大值点;当  $\sigma_s/d_r$  为 2 和 4 时,平均误码率存在极小值点,且  $\sigma_s/d_r$  值越大,极值点对应的光束发散角越大。

## 参 考 文 献

[1] Zhou L L, Yun J P, Yang H F, et al. Outage (C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net> 050101-6

- probability analysis of coherent optical communication system with pointing error in exponentiated Weibull channel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110602.
- 周凌林, 鄢建平, 杨海峰, 等. 指数韦伯信道下带瞄准误差的相干光通信系统中断概率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110602.
- [2] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance of free space optical communication system based on differential detection with zero decision threshold under Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106001.
- 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. Gamma-Gamma 大气湍流下零判决门限差分探测自由空间光通信系统误码率性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106001.
- [3] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Diversity reception technology in coherent optical communication over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0706002.
- 孙晶, 黄普明, 么周石. Gamma-Gamma 大气湍流下相干光通信分集接收技术研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0706002.
- [4] Prokes A. Atmospheric effects on availability of free space optics systems[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(6): 066001.
- [5] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K, et al. BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(1): 44-46.
- [6] Liu C, Yao Y, Sun Y X, et al. Average capacity optimization in free-space optical communication system over atmospheric turbulence channels with pointing errors[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3171-3173.
- [7] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [8] Kaur P, Jain V K, Kar S. Performance of free space optical links in presence of turbulence, pointing errors and adverse weather conditions[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48: 65.
- [9] Jurado-Navas A, Garrido-Balsells J M, Paris J F, et al. A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation[EB/OL]. (2011-02-09)[2019-07-21]. <https://arxiv.org/abs/1102.1915>.
- [10] Jurado-Navas A, Garrido-Balsells J M, Paris J F, et al. Impact of pointing errors on the performance of generalized atmospheric optical channels[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12550-12562.
- [11] Ansari I S, Yilmaz F, Alouini M S. Performance analysis of free-space optical links over Málaga (M) turbulence channels with pointing errors [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(1): 91-102.
- [12] López-González F J, Garrido-Balsells J M, Jurado-Navas A, et al. Performance evaluation of atmospheric optical communications links affected by generalized Málaga turbulence model [J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 95(2): 557-567.
- [13] Alheadary W G, Park K H, Alouini M S. Bit error rate analysis of free-space optical communication over general Malaga turbulence channels with pointing error[C] // 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 4-8, 2016, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2016: 16555946.
- [14] Vellakudiyan J, Ansari I S, Palliyembil V, et al. Channel capacity analysis of a mixed dual-hop radio-frequency-free space optical transmission system with Málaga distribution[J]. *IET Communications*, 2016, 10(16): 2119-2124.
- [15] Ansari I S, Abdallah M M, Alouini M S, et al. Outage analysis of asymmetric RF-FSO systems[C]//2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), September 18-21, 2016, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2016: 16758915.
- [16] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB ©[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [17] Wolfram research. The mathematical functions site [EB/OL]. [2019-07-21]. <http://functions.wolfram.com>.
- [18] Han L Q, Wang Q, Shida K. Performance of free space optical communication over Gamma-Gamma atmosphere turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1322.
- 韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1318-1322.