



DOI: 10.12086/oe.2020.190337

# M 分布模型下多跳相干 OFDM FSO 系统的性能研究

吴昊<sup>1</sup>, 王怡<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> 中国计量大学信息工程学院, 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup> 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641;

<sup>3</sup> 深海载人装备国家重点实验室, 江苏 无锡 214082

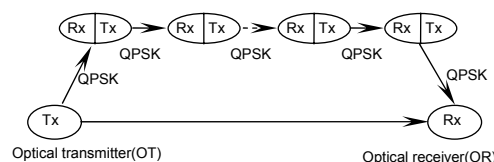
**摘要:** 本文在涵盖了从弱湍流到强湍流的所有信道条件, 能够表征现有大多数湍流信道的 M 分布模型下, 采用 QPSK 调制方式研究了多跳相干 OFDM FSO 系统的性能。系统在中继辅助链路的发射机和接收机之间使用 DF 中继协议。考虑大气湍流、路径损耗以及瞄准误差对大气信道衰落模型的联合作用, 分别推导出系统的中断概率和误符号率的 Meijer G 形式的闭合表达式。通过仿真分析了中继链路长度、中继节点数以及子载波个数等关键因素对系统的中断性能和误符号率性能的影响。本研究为中继系统的实际应用奠定了理论基础。

**关键词:** 自由空间光通信; 正交频分复用; 多跳; M 分布模型; 正交相移键控

**中图分类号:** TN929.12

**文献标志码:** A

**引用格式:** 吴昊, 王怡. M 分布模型下多跳相干 OFDM FSO 系统的性能研究[J]. 光电工程, 2020, 47(1): 190337



## Performance study of multi-hop coherent OFDM FSO system over M distribution model

Wu Hao<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Deep Sea Manned Vehicles, Wuxi, Jiangsu 214082, China

**Abstract:** The performance of multi-hop coherent orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) free space optical (FSO) system is studied by using quadrature phase shift keying (QPSK) modulation in this paper. A generalized model called M distribution is selected, which is suitable for all categories of turbulence ranging from weak to strong and characterizes other existing statistical models of atmospheric turbulence induced fading as its special case. The system uses decode and forward (DF) relay protocol between the transmitter and receiver of the relay auxiliary link. Considering the joint attenuation effects of atmospheric turbulence, path loss and pointing error on the

收稿日期: 2019-06-19; 收到修改稿日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704267); 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室开放基金(2019-skllmd-13); 深海载人装备国家重点实验室开放基金(702SKL201702)

作者简介: 吴昊(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事自由空间激光通信和星地光通信方面的研究。E-mail: 1369071835@qq.com

通信作者: 王怡(1980-), 女, 博士, 教授, 主要从事自由空间激光通信和星地光通信方面的研究工作。E-mail: wcy16@cjlu.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

atmospheric channel fading model, we derive the Meijer G closed-form expressions of outage probability and symbol error rate (SER). Furthermore, the effects of key factors, such as relay link length, the number of relay nodes and subcarriers on the outage and SER performance of OFDM FSO system are analyzed through simulations. This work lays a theoretical foundation for the practical application of the relay system.

**Keywords:** free space optical; orthogonal frequency division multiplexing; multi-hop; M distribution model; quadrature phase shift keying

**Citation:** Wu H, Wang Y. Performance study of multi-hop coherent OFDM FSO system over M distribution model[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(1): 190337

## 1 引言

自由空间光通信(Free-space optical, FSO)也称为大气光通信,是一种在不需光纤的情况下通过激光信号在大气信道下传播实现的双向通信系统。它可以在特殊复杂地形处快速组网建立通信链路,被认为是“最后一公里问题”切实可行的解决方法。因为其传输速率高、可用频带宽、低功率损耗以及保密性好等优点引起了学术界广泛地关注。此外,自由空间光通信系统还具有抗干扰能力强、无需频谱许可以及全双工传输和协议透明性等优点<sup>[1-3]</sup>。由于FSO技术的各种优势,可以应用到很多领域,例如,对城域网的扩展、企业校园网的互连传输、无线基地数据的回转、应用于军事场所等。尽管具有上述优点,但是FSO性能的主要缺陷是大气湍流效应,它是由于大气中温度和压力变化的不均匀性导致传播介质折射率的变化而引起的<sup>[4]</sup>。即使在晴朗的天气条件下,大气湍流也会减弱传播信号,造成所谓的闪烁效应,从而导致接收到的信号辐照度在时间和空间上随机波动。因此,FSO链路的性能显著降低,特别是在深信号衰减和长链路的影响下。除了大气湍流外,主要由水分子、二氧化碳分子和臭氧分子引起的吸收作用,雾粒子引起的气溶胶散射作用以及群速度的色散作用形成路径损耗,使得光束在传播过程中产生衰减<sup>[5]</sup>。另外一个严重影响FSO链路性能的因素是发射机和接收机失调导致的瞄准误差。这是由于风荷载、热膨胀和弱地震引起高层建筑物抖动,使得安装在高层建筑物上的发射机和接收机之间未对准,而光束在接收端的横向半径非常小,因此建筑物抖动引起的微小变化也会产生显著的瞄准误差<sup>[6]</sup>。

为了解决这一问题,串行中继技术的加入能够有效地改善FSO系统的性能。串行中继是指在一个通信链路中加入多个中继节点,由源节点发射的信号通过串行的链路方式传递到目的节点。串行中继在扩大发

射信号覆盖范围的同时也可以使系统在部署和连接等方面有很大的优势,提高了通信系统的灵活性,增加了系统的可靠性和数据率<sup>[7]</sup>。2014年希腊学者Nistazakis对多跳正交振幅调制/相移键控(quadrature amplitude modulation/phase shift keying, QAM/PSK) OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)系统在Gamma-Gamma大气信道以及饱和湍流信道下的误码率情况进行了仿真分析,系统采用直接探测和DF中继方式,研究了系统的误码性能<sup>[8]</sup>,但文中作者未考虑到路径损耗和瞄准误差给系统性能带来的影响。2017年Al-Qahtani研究了双跳射频/自由空间光(radio frequency/free space optical, RF/FSO)链路的中断性能,采用放大转发(amplify and forward, AF)中继方式,得到了中断概率的渐近闭合表达式,并研究了双跳的最优功率分配<sup>[9]</sup>。2011年, Jurado-Navas等人提出了一种新的更为通用的数学模型—M分布,该模型适用于所有湍流范围(从弱到强),对实验数据具有很好的拟合性。特别地它包含了大多数以前报道过的辐照度波动的统计模型,例如K分布和Gamma-Gamma分布<sup>[10]</sup>。2014年, Yang等学者考虑了瞄准误差,在具有多个接收孔径的M分布湍流通道上研究了自由空间光通信系统,推导了瞬时信噪比的统计特性,分析了系统的渐近误码率(bit error rate, BER)性能,但文中没有考虑加入中继技术,并且对系统的中断性能也未研究<sup>[11]</sup>。2018年, Priyadarshani等人在M分布模型下基于强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)研究了单输入多输出(single input multiple output, SIMO)FSO系统的中断性能<sup>[12]</sup>,但文中采用了抗噪声性能较差的开关键控(on-off keying, OOK)调制技术。相较于OOK调制,正交相移键控(quadrature phase shift keying, QPSK)调制技术具有通用性强、误码率低、频谱利用率高、抗干扰性能强等优点。目前,对于OFDM FSO系统在M分布大气湍流下采用QPSK调制技术的相关研究还未见报道。

基于以上分析,在本文中,多跳相干自由空间光通信系统采用 QPSK 调制,中继方式采用 DF。考虑到大气湍流的光强闪烁、路径损耗以及发射机和接收机未瞄准偏差对大气信道衰落模型的联合作用,分别推导出在  $M$  分布模型下系统的中断概率和误符号率的闭合表达式。并且针对系统跳数、子载波个数以及中继链路长度等关键因素对多跳相干 OFDM FSO 系统的中断性能和误符号率性能的影响进行了仿真研究。

## 2 系统模型

图 1(a)显示了多跳 FSO 通信链路的框图,  $T_x$  是光发射机(optical transmitter, OT),  $R_x$  是光接收机(optical receiver, OR),  $R_1, R_2, \dots, R_{L-2}, R_{L-1}$  为中继节点,每个中继节点  $R_i$  又由  $T_x$  和  $R_x$  两部分组成。本系统每个中继节点采用相干探测方式。光发射机发出的光信号经由  $L-1$  个串联的中继节点到达光接收机,采用的调制方案是 QPSK,易知系统总的跳数为  $L$ 。考虑到 AF 中继方式在把信号放大转发到下一个中继节点的同时,也会放大中继节点的噪声,不利于系统通信,所以采用 DF 中继传输方式。DF 中继传输是指中继节点将接受到的上个节点发送出的信号进行解调、解码,中继节点再将数据进行编码、调制传输到下一个节点。

如图 1(b)所示,在系统的发射端  $T_x$  中,由低通滤波器(low-pass filter, LPF)除去 OFDM 信号中的高频噪声,然后将外加高频信号 LO1 与 OFDM 信号混频后,得到一个中频信号。经过带通滤波器(band-pass filter, BPF)滤掉高低频噪声,最后进行电光转换的光信号由发射天线(transmitting antenna, TA)发射到大气信道中。在接收端  $R_x$ ,将接收信号经过光放大器(amplifier, AM)进行放大处理,使用相干探测方式,然后使光信号和本振光 LO2 的混频。使用光带通滤波器(optical band-pass filter, OBPF)滤掉高频项和直流,经光电探

测器(photodetector, PD)转换成电信号。此时的电信号经过 BPF 将信号带宽锁定在中频信号范围内。最后,通过加入高频信号 LO3 检测差频信号,解调出原始的 OFDM 信号。

## 3 衰减模型

### 3.1 大气湍流模型

$M$  湍流模型是一种物理模型,适用于全范围大气湍流强度下的无界光波前传输,其光强起伏概率密度函数(probability density function, PDF)为<sup>[10]</sup>

$$f_{h_a}(h_a) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k (h_a)^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left( 2\sqrt{\chi h_a} \right), \quad (1)$$

式中:

$$\chi = \frac{\alpha\beta}{\eta\beta + \Omega'}, \quad A = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\eta^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \cdot \chi^{\beta+\frac{\alpha}{2}},$$

$$a_k \triangleq \frac{(\beta-1)}{(k-1)} \frac{(\eta\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{(k-1)!} \left( \frac{\Omega'}{\eta} \right)^{k-1} \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}},$$

$\alpha$  是一个在散射过程中关于大尺度单元有效数量的正参数,  $\beta$  是一个与小尺度涡流产生的衍射效应有关的自然数。 $\eta = 2b_0(1-\rho)$  表示经典散射分量  $U_s^G$  的平均功率。 $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$  表示与 LOS 耦合的散射功率和所有散射分量功率的比值。参数  $\Omega'$  表示相干平均功率的贡献,  $K_v(\cdot)$  是  $v$  阶第二类 Bessel 修正函数。

### 3.2 大气路径损耗

大气效应,如雾、雨、雪、太阳辐射、大气气体、气溶胶和空气中产生的粒子会对大气中的光束产生吸收和散射作用。光波穿过大气时由于吸收和散射作用而产生的损耗被定义为指数比尔-朗伯定律<sup>[13-16]</sup>:

$$h_1(d) = \exp(-\sigma d), \quad (2)$$

式中:  $d$  为链路长度,  $\sigma$  为衰减系数。大气损耗依赖于

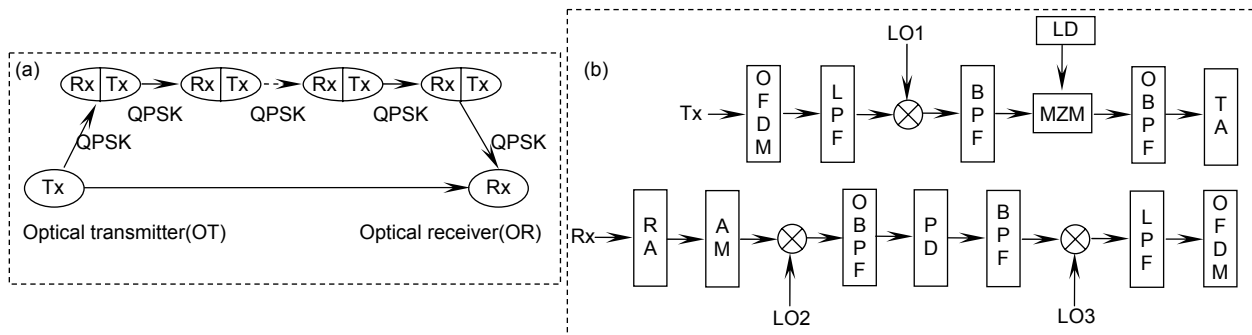


图 1 (a) 多跳 FSO 通信系统; (b) 相干 OFDM 系统发射端和接收端结构框图

Fig. 1 (a) Multi-hop FSO communication system; (b) Structural block diagram of transmitter and receiver for coherent OFDM system

散射粒子大小和分布，可以直接从大气中测量出来，因此大气损耗衰减因子在长时间内被认为是常数<sup>[17]</sup>，本文 $\sigma=0.82$ 。

### 3.3 瞄准误差

瞄准误差  $h_p$  产生的实质就是激光束在发射和接收时因为受大自然风速、热度的影响以及发射机接收机在平台未做到完全理想化固定而产生的抖动。瞄准误差的 PDF 可以表示为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2}} (h_p)^{\xi^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (3)$$

式中： $\xi = w_{z\text{eq}} / 2\delta_s$ ， $\delta_s$  代表发射机与接收机平台未理想化固定导致随机抖动而产生的抖动误差， $\delta_s / r$  表示为归一化抖动误差。本文将影响瞄准误差的两个重要因素光束宽度和抖动误差固定为  $w_z / r = 25$ ， $\delta_s / r = 3$ 。

### 3.4 信道联合衰减

在一定的湍流条件  $h_a$ 、链路衰减  $h_l$  下瞄准误差的条件概率分布密度，可以表示为

$$f_{h|h_a}(h|h_a) = \frac{1}{h_a h_l} f_{h_p} \left( \frac{h}{h_a h_l} \right) = \frac{y^2}{A_0^y h_a h_l} \left( \frac{h}{h_a h_l} \right)^{y^2-1}, \quad (4)$$

式中： $0 \leq h \leq A_0 h_a h_l$ 。根据 Merjer G 函数的积分性质可得 M 分布模型下信道状态  $h$  的闭合 PDF 表达式为

$$f_h(h) = \int f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a = \frac{A\xi^2}{2h} \sum_{k=1}^{\beta} a_k (\chi)^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{1,3}^{3,0} \left[ \chi \frac{h}{A_0 h_l} \middle| 1+\xi^2 \right]. \quad (5)$$

## 4 性能分析

### 4.1 中断性能分析

中断性能对系统通信质量起着至关重要的作用，中断概率定义为瞬时接收信噪比低于特定阈值信噪比  $\mu_{th}$  的概率。则 QPSK 调制方式下 M 分布单跳系统的中断概率的闭合表达式为

$$P_{out} = \Pr[\min(\mu_i) \leq \mu_{th}] = \frac{A\xi^2}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \cdot \chi^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{2,4}^{3,1} \left[ \chi \frac{x\sqrt{N/T}}{A_0 h_l} \middle| 1, 1+\xi^2 \right]. \quad (6)$$

本文中相干 OFDM 多跳系统采用串行 DF 模式时，多跳系统的中断概率依赖于每一跳系统链路的中断概率，因此对于跳数为  $L$  的串行中继系统的中断概率可以计算为

$$P_{out}(\mu_{th}) = \Pr[\min(\mu_i) \leq \mu_{th}] = 1 - \prod_{i=1}^L \Pr[\mu_i \geq \mu_{th}] = 1 - \prod_{i=1}^L \Pr \left\{ 1 - \frac{A\xi^2}{2} \sum_{k=1}^{\beta} a_k \cdot \chi^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{2,4}^{3,1} \left[ \chi \frac{x\sqrt{N/T}}{A_0 h_l} \middle| 1, 1+\xi^2 \right] \right\}. \quad (7)$$

### 4.2 误符号率分析

假设 OFDM 系统发射端采用 QPSK 调制方式时，根据<sup>[18]</sup>：

$$\text{erfc}\sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[ x \middle| 1, 0, 0.5 \right]$$

得系统误符号率为

$$P_s = Q \left( \sqrt{\bar{y} h^2 \frac{2TB}{N}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[ \frac{\bar{y} T B h^2}{N} \middle| 1, \frac{1}{2} \right]. \quad (8)$$

式中： $Q(y)$  为 Gaussian-Q 函数，满足  $Q(\sqrt{2}\alpha) = 0.5\text{erfc}(\alpha)$ ， $\text{erfc}(\alpha)$  为补余误差函数， $\bar{y}$  为平均信噪比， $h$  为信道状态因子， $T$  为 OFDM 的符号周期， $B$  为带宽， $N$  为子载波个数，则利用 Meijer G 积分函数的运算性质可得在 M 分布模型下单跳相干 OFDM FSO 系统的平均误符号率的闭合表达式形式为

$$P_{S,AV,i} = \int_{-\infty}^{\infty} P_s \cdot f_h(h) dh = \frac{A\xi^2}{\pi^{3/2}} \sum_{k=1}^{\beta} \left( a_k 2^{\alpha+k-5} (\chi)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{7,4}^{2,6} \left[ \frac{16\bar{y} T B A_0^2 h_l^2 \chi^{-2}}{N^2} \middle| \rho_1 \right] \right). \quad (9)$$

对于多跳 DF 中继模式下的 OFDM 系统，假设系统跳数为  $L$ ，则在 M 分布湍流下系统总的平均误符号率 (SER，用  $R_{SER}$  表示) 的闭合表达式为

$$R_{SER-AV} = \sum_{i=1}^L \left[ P_{S,AV,i} \cdot \prod_{j=i+1}^L (1 - 2P_{S,AV,j}) \right] = \sum_{i=1}^L \left\{ \nu \sum_{k=1}^{\beta} \left[ a_k 2^{\alpha+k-5} \chi^{-\frac{\alpha+k}{2}} \times G_{7,4}^{2,6} (\kappa | \rho_1) \right] \times \prod_{j=i+1}^L \left[ 1 - \nu \sum_{k=1}^{\beta} \left( a_k 2^{\alpha+k-4} \chi^{-\frac{\alpha+k}{2}} \times G_{7,4}^{2,6} (\kappa | \rho_1) \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

其中：

$$\nu = \frac{A\xi^2}{\pi^{3/2}}, \quad \kappa = \frac{16\bar{y} \cdot T \cdot B \cdot A_0^2 \cdot h_l^2 \cdot \chi^{-2}}{N}, \quad \rho_1 = 0, \frac{1}{2}, -\frac{\xi^2}{2}, \frac{1-\xi^2}{2},$$



$$\rho_2 = 1, \frac{1-\zeta^2}{2}, \frac{2-\zeta^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, \frac{2-k}{2}。$$

## 5 仿真结果与分析

### 5.1 中断概率

本文在 M 分布弱、中、强三种大气湍流下对多跳相干 OFDM FSO 系统的中断性能进行仿真分析,其中 OFDM 发射模块调制方式采用 QPSK,多跳相干 OFDM FSO 系统的各个参数选择如表 1 所示。

表 1 多跳相干 OFDM FSO 系统参数  
Table 1 The parameters of multi-hop coherent OFDM FSO system

系统参数	符号	取值
总散射分量的平均功率	$2b_0$	1.2
接收端半径/m	$r$	0.1
光波束宽度/m	$w_z$	2.5
抖动标准差/m	$\delta_s$	0.3
LOS 项的平均功率	$\Omega$	0.4
LOS 和耦合到 LOS 散射项的确定相位之差	$\varphi_A - \varphi_B$	$\pi/2$
弱大气湍流	$(\delta_R^2, \alpha, \beta, \rho)$	(4.58,4.48,1,0.75)
中大气湍流	$(\delta_R^2, \alpha, \beta, \rho)$	(1.02,4.37,3,0.75)
强大气湍流	$(\delta_R^2, \alpha, \beta, \rho)$	(0.46,6.30,5,0.75)
OFDM 的符号周期/ms	$T$	10
带宽/MHz	$B$	26

图 2 表示子载波个数为 256,每路中继间链路长度为 1 km 时,多跳相干 OFDM 自由空间光通信系统在不同大气湍流强度和跳数情况下的中断概率仿真图。如图 2(a)所示,在强大气湍流下,将归一化门限值固定为-20 dB,此时跳数  $L=1、2、3、4、5$  相对应的中断概率为 0.16、0.3、0.42、0.51、0.59,显然当中继节点数增加时,系统的中断概率也在增加。另外,由图可见往通信链路中增加一个中继节点时,系统中断概率上升明显,随后继续增加中继节点时,系统中断概率上升的幅度越来越小,这是由于 OFDM FSO 系统本身对大气湍流具有良好的免疫能力,对于每个中继节点采用的相干探测方式也进一步优化了系统的整体接收性能。当提高归一化门限值时会导致系统的中断概率增加,并且随着归一化门限值的增加中断概率上升得越快,特别当归一化门限值大于-8 dB 时,多跳系统发生通信中断的概率几乎达到百分之百。因此控制好门限值可以降低多跳相干 OFDM 系统通信中断

的概率,提高系统的稳定性,图 2(b)~2(c)可以得到类似的结论。通过对图 2(a)~2(c)的比较,当归一化门限值固定为-15 dB 时,在弱、中、强大气湍流下三跳系统( $L=3$ )的中断概率分别由 0.63、0.7 上升到 0.8,由此可见随着湍流强度的增加 OFDM FSO 系统的中断概率增加。

图 3 表示在弱、中、强大气湍流下,子载波个数为 256,系统跳数为 2 时,系统在不同中继间链路长

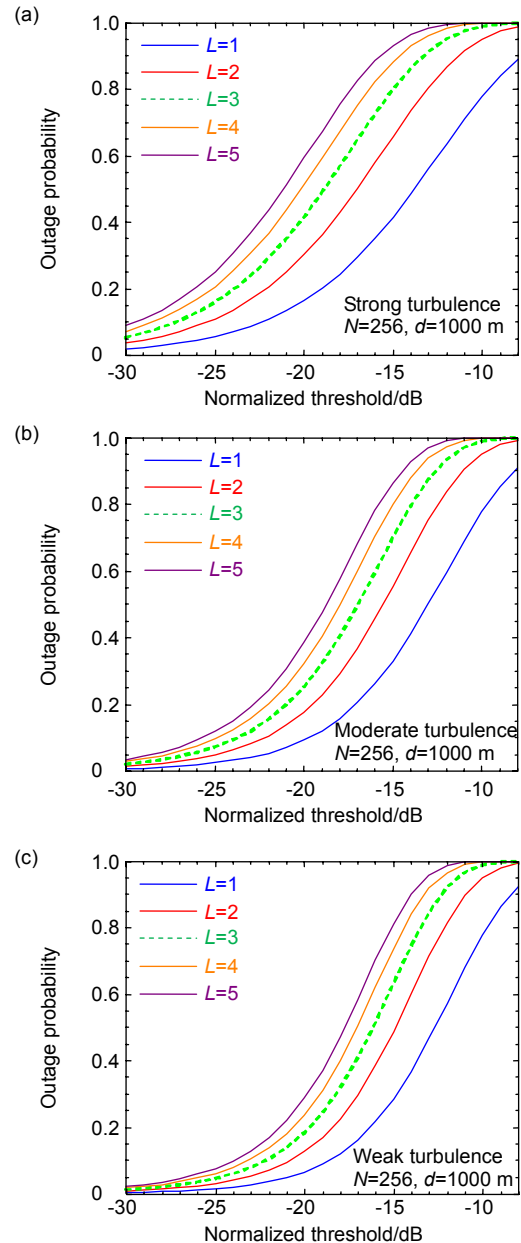


图 2 跳数  $L=1、2、3、4、5$  时 OFDM FSO 系统的中断概率仿真图。(a) 强湍流; (b) 中湍流; (c) 弱湍流  
Fig. 2 Outage probability simulation diagram of OFDM FSO system with hop number  $L=1,2,3,4,5$ . (a) Strong turbulence; (b) Moderate turbulence; (c) Weak turbulence

度下的中断概率。通过图 3(b)可以看出,在中湍流下,当归一化门限值为-26 dB 时,链路长度为 1000 m、2000 m、3000 m 对应系统的中断概率分别为 0.06、0.23、0.42。由此可见,OFDM FSO 系统的中断概率随着相邻中继间链路长度的增加而增加。虽然中继间链路的长度越长,通信系统覆盖的范围就越大,但是过长的链路会影响系统性能,可能导致系统通信发生中断。因此,我们选择 1000 m 作为相干多跳系统相邻中继节点之间的长度。

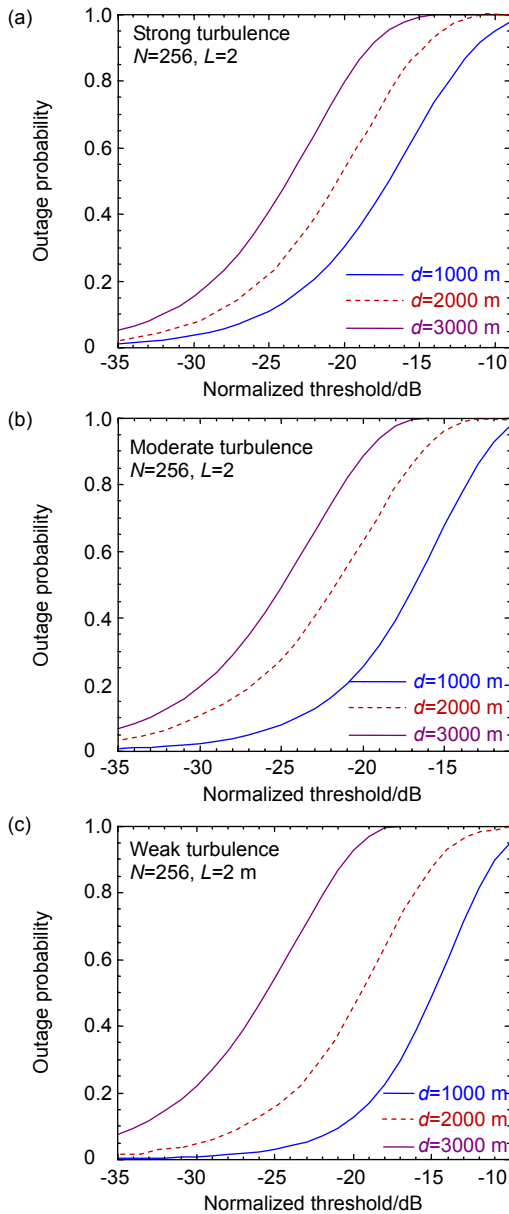


图 3 OFDM FSO 系统在不同中继间链路长度下的中断概率仿真图。(a) 1000 m; (b) 2000 m; (c) 3000 m

Fig. 3 Outage probability simulation diagram of OFDM FSO system under different relay link lengths. (a)  $d=1000$  m; (b)  $d=2000$  m; (c)  $d=3000$  m

OFDM 只是一种调制技术,而衡量一个系统好坏不能只看一个系统是否是 OFDM 调制方式,而应该看该系统的实际实现方式,如子载波个数就是一个最基本的因素。图 4 表示在弱、中、强大气湍流下双跳( $L=2$ )系统在不同子载波个数  $N=128$ 、256、512 下的中断概率仿真图。通过对图 4(c)的观察,将归一化门限值固定为-18 dB,子载波个数为 128、256、512 时对应的中断概率分别为 0.15、0.22、0.34,可知系统的中断概率随着子载波个数的增加而增加。虽然子载波个数的增

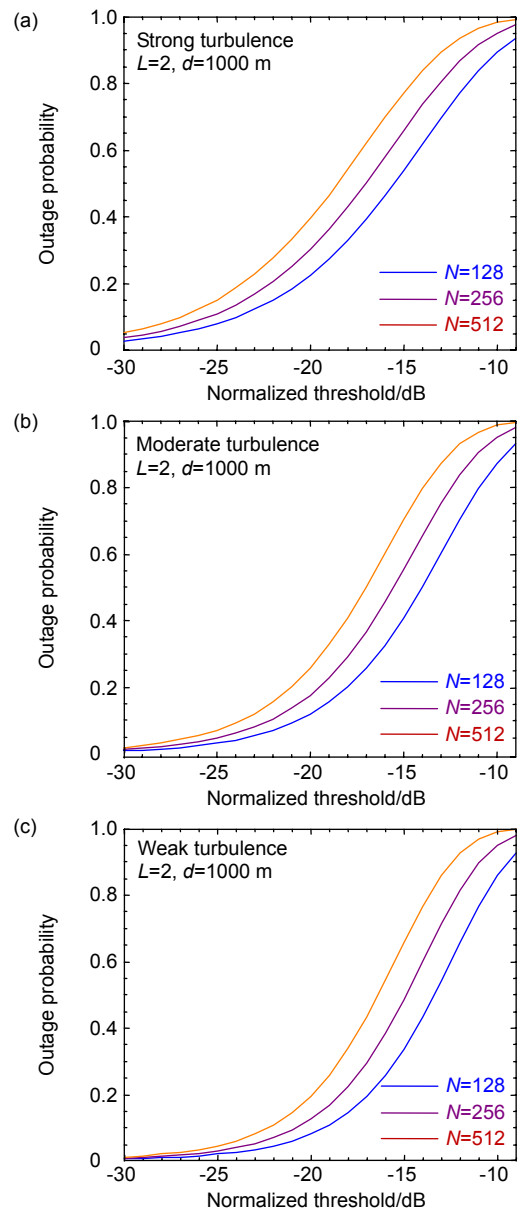


图 4 OFDM FSO 系统在不同子载波个数  $N=128$ 、256、512 下的中断概率仿真图

Fig. 4 Outage probability simulation diagram of OFDM FSO system with different subcarriers  $N=128$ , 256 and 512

加会提高频谱效率,子载波功率的分配也越容易趋近信道容量,但却以牺牲系统的中断性能作为代价。因此,子载波个数并不是越多越好,在后面的仿真分析中,我们选择中间值子载波个数为 256。

### 5.2 误符号率

图 5 表示在不同大气湍流强度下 OFDM FSO 系统在跳数  $L=1, 2, 3, 5$  时的误符号率仿真图。我们分析了平均信噪比与系统误符号率的关系,此外考虑了两

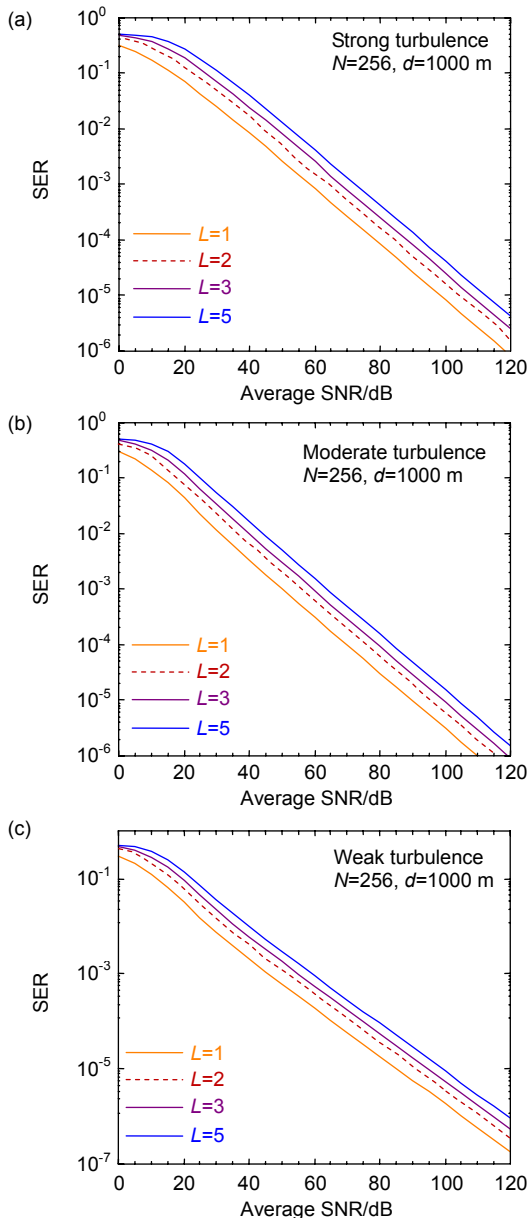


图 5 跳数  $L=1, 2, 3, 5$  时 OFDM FSO 系统的误符号率仿真图。(a) 强湍流; (b) 中湍流; (c) 弱湍流  
Fig. 5 Symbol error rate simulation diagram of OFDM FSO system with hop number  $L=1, 2, 3, 5$ . (a) Strong turbulence; (b) Moderate turbulence; (c) Weak turbulence

个明显影响系统误符号性能的因素,就是大气湍流强度和中继节点数,其中 OFDM 发射模块调制方式采用 QPSK。系统能维持正常通信的基本要求是系统的误符号率要小于  $10^{-5}$  数量级。如图 5(a)所示,在强大气湍流情况下,系统的子载波个数和链路长度分别设置为 256 和 1000 m,当系统的误符号率在  $10^{-5}$  数量级时,中继节点数为 1、2、3、5 时对应多跳相干系统的平均信噪比大约为 98 dB、105 dB、108 dB、112 dB。由此可知,系统的误符号率随着中继节点个数的增加而增加,并且双跳系统较单跳系统的误符号率上升明显,随后继续往通信链路中增加中继节点时,系统误符号率上升的趋势减小。然而,这并不意味着中继节点数越多越好,考虑到系统成本问题,通信链路中的中继节点个数不宜过多,取中间值比较适宜,如  $L=3$ 。同时,随着平均信噪比的增加,系统的误符号率降低。通过对图 5(a)~5(c)的比较,当平均信噪比固定在 90 dB 时,双跳系统在弱、中、强大气湍流下的误符号率分别由  $1.15 \times 10^{-5}$ 、 $1.95 \times 10^{-5}$  上升至  $5.3 \times 10^{-5}$ ,表明在同一平均信噪比下,随着大气湍流强度的增大,系统的误符号率也增大。系统的误码性能的规律恰好与中断性能保持一致。因此,在实际工程应用上可以参考中断概率和误符号率这两个重要的性能指标。

图 6 表示子载波个数和系统跳数固定时,系统在不同中继间链路长度下的误符号率仿真图。如图 6(b)所示,当系统的误符号率在  $10^{-5}$  数量级时,中湍流下系统在中继间链路长度为 1000 m 时的平均信噪比大约为 101 dB,2000 m 相比较于 1000 m 系统的平均信噪比提高了 14 dB,而 3000 m 相比较于 2000 m 系统的平均信噪比则提高了 5 dB。显而易见,系统的误符号率随着中继间链路距离的增加而增加。同时,中继链路长度越大系统维持正常通信所需的信噪比就越大,这对激光器的输出功率提出更大的要求,将导致成本增加。通过以上分析,本文中中继链路长度我们选择 1000 m 较为合适。中继间链路长度对系统误码性能的影响和对中断性能的影响规律保持一致。

图 7 表示在弱、中、强大气湍流下双跳系统在不同子载波个数时的误符号率仿真图。如图 7(a)所示,当中继间链路长度为 1000 m,平均信噪比固定在 100 dB 时,在强大气湍流下子载波个数为 128、256、512 对应双跳系统的误符号率分别为  $1.19 \times 10^{-5}$ 、 $1.68 \times 10^{-5}$ 、 $2.37 \times 10^{-5}$ 。可见,相干多跳系统的误符号率随着子载波个数的增加而增加,这是由于增加子载波个数,在

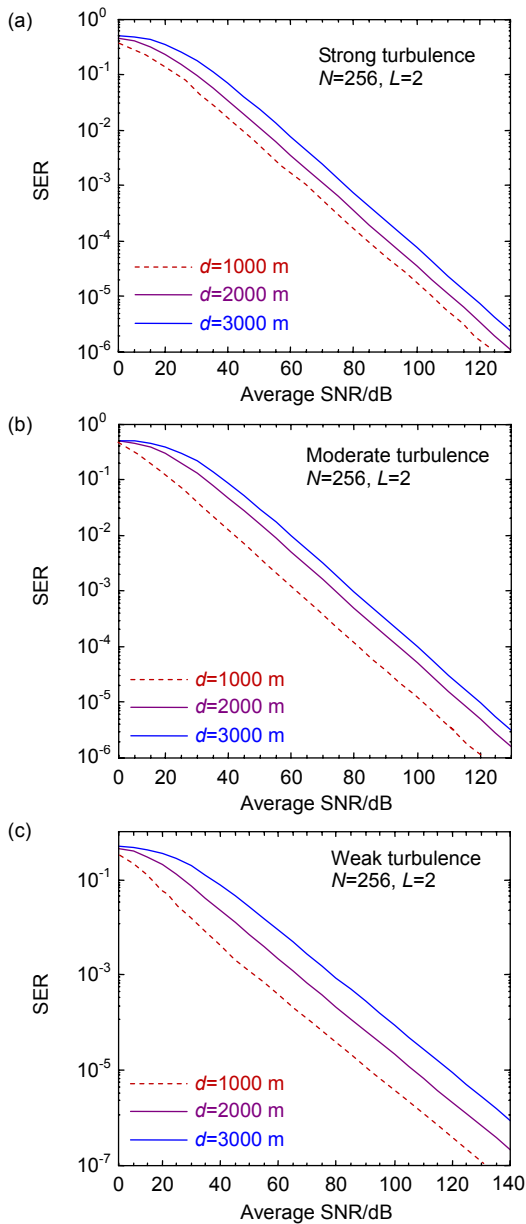


图6 OFDM FSO系统在不同中继链路长度下的误符号率仿真图。(a) 1000 m; (b) 2000 m; (c) 3000 m

Fig. 6 Symbol error rate simulation diagram of OFDM FSO system under different relay link lengths. (a)  $d=1000$  m; (b)  $d=2000$  m; (c)  $d=3000$  m

总带宽近似不变的情况下,相邻子载波的间隔会变小,而非线性对系统的影响与子载波间隔成反比,从这个方面考虑它会增加系统的误码率。同时,子载波个数越多,对同步、编码、关键元器件的精度和稳定性等的要求越高,系统设计越复杂,系统稳定性越难控制。但子载波的数量越多,对多径干扰的抑制能力越强。综合考虑,系统子载波个数取中间值  $N=256$  较为合适。图 7(b)~7(c)可以得到相同的结论。

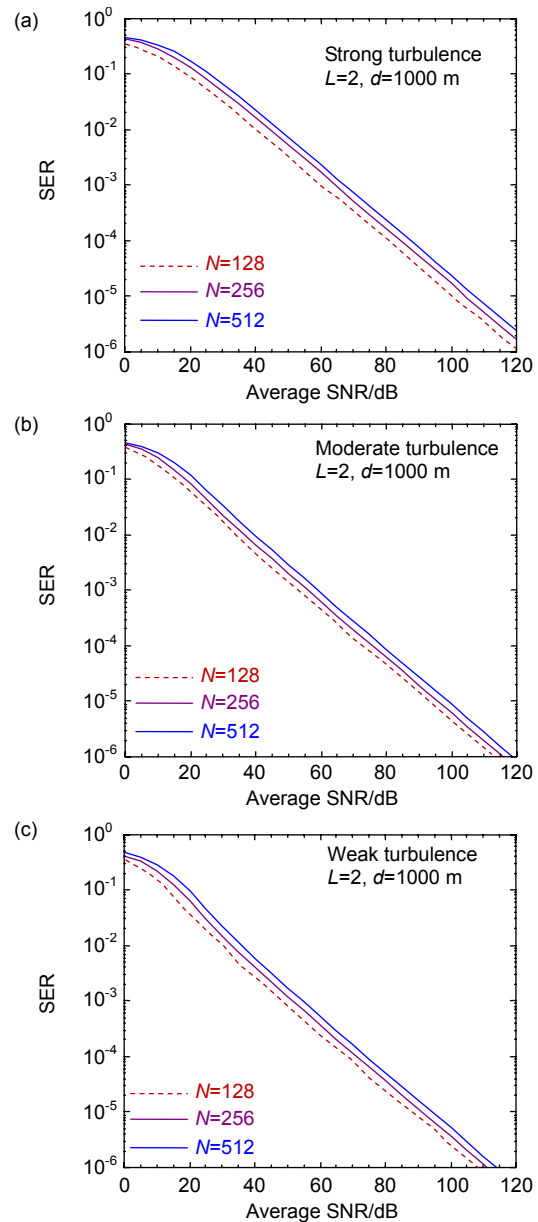


图7 OFDM FSO系统在不同子载波个数  $N=128$ 、256、512下的中断概率仿真图

Fig. 7 Outage probability simulation diagram of OFDM FSO system with different subcarriers  $N=128$ , 256 and 512

## 6 结论

本文在由弱到强范围的湍流起伏区环境下,考虑大气湍流、路径损耗以及瞄准误差三者对大气信道衰落模型的联合作用,在一种新的广义统计模型——M分布下推导了自由空间光通信系统的中断概率和误符号率的闭合表达式,并对此进行仿真,分析了跳数、子载波个数及中继链路长度等关键因素对通信系统性



能的影响。其中, DF 串行中继方式下的调制技术为 QPSK。仿真结果表明: 增加系统中继节点数、子载波个数、中继链路长度和湍流强度, 都会导致系统的中断概率和误符号率增加。通过分析可知, 子载波个数为 256, 中继间链路长度为 1000 m 比较合适。此外, 减小归一化门限值可以降低系统的中断概率。因此, 可以通过控制合适的归一化门限值来提高通信系统的稳定性。同时, 增大平均信噪比可以提高系统的误符号率性能。并且得知, 当往通信链路中加入一个中继节点时, OFDM FSO 系统的中断概率和误符号率上升得比较明显, 随着中继节点的继续加入, 系统的中断性能和误符号性能下降的趋势越来越小。虽然随着中继节点的增加, 系统在中断和误符号性能上都有所牺牲, 但是解决了系统链路的设计问题, 比如在有建筑物的遮挡时使发射和接收端无法通信等等, 同时这种中继方式下的多跳系统也使发射端的覆盖范围更加广泛, 使系统设计更加灵活。由于本系统利用了 OFDM 技术抵抗大气湍流的能力以及相干探测的优势, 使得多跳系统在实际应用中更具前景, 对未来的 FSO 通信系统的设计具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] Fu Q, Jiang H L, Wang X M, et al. Research status and development trend of space laser communication[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(2): 116–125.  
付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. *中国光学*, 2012, **5**(2): 116–125.
- [2] Li X F. *The Principle and Technology of the Satellite-to-ground Laser Communication Links*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.  
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, 2007.
- [3] Zhang Y, Wang X, Zhao S H, et al. BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(2): 170540.  
张韵, 王翔, 赵尚弘, 等. Exponentiated Weibull 大气湍流下 PSK-OFDM 机载光链路性能分析[J]. *光电工程*, 2018, **45**(2): 170540.
- [4] Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, et al. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, **8**(2): 951–957.
- [5] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, **16**(4): 2231–2258.
- [6] 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.
- [7] Jeyarani J, Kumar D S. BER analysis of serial relay-assisted FSO systems over strong atmospheric turbulence[C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Networking*, Chennai, India, 2015: 1–6.
- [8] Nistazakis H E, Stassinakis A N, Sheikh Muhammad S, et al. BER estimation for multi-hop RoFSO QAM or PSK OFDM communication systems over gamma gamma or exponentially modeled turbulence channels[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, **64**: 106–112.
- [9] Al-Qahtani F S, El-Malek A H A, Ansari I S, et al. Outage analysis of mixed underlay cognitive RF MIMO and FSO relaying with interference reduction[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 7902722.
- [10] Jurado-Navas A, Garrido-Balsells J M, Paris J F, et al. A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation[M]//Awrejcewicz J. *Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes*. Rijeka, Croatia: InTech, 2011: 181–206.
- [11] Yang L, Hasna M O, Gao X Q. Asymptotic BER analysis of FSO with multiple receive apertures over  $M$ -distributed turbulence channels with pointing errors[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 18238–18245.
- [12] Priyadarshani R, Bhatnagar M R, Ghassemlooy Z, et al. Outage analysis of a SIMO FSO system over an arbitrarily correlated  $M$ -distributed channel[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(2): 141–144.
- [13] Varotsos G K, Nistazakis H E, Volos C K, et al. FSO links with diversity pointing errors and temporal broadening of the pulses over weak to strong atmospheric turbulence channels[J]. *Optik*, 2016, **127**(6): 3402–3409.
- [14] Awan M S, Horwath L C, Muhammad S S, et al. Characterization of fog and snow attenuations for free-space optical propagation[J]. *Journal of Communications*, 2009, **4**(8): 533–545.
- [15] Popoola W O, Ghassemlooy Z, Allen J I H, et al. Free-space optical communication employing subcarrier modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel[J]. *IET Optoelectronics*, 2008, **2**(1): 16–23.
- [16] Safari M, Uysal M. Relay-assisted free-space optical communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, **7**(12): 5441–5449.
- [17] Nistazakis H E, Stassinakis A N, Sandalidis H G, et al. QAM and PSK OFDM RoFSO over  $M$ -turbulence induced fading channels[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 7900411.
- [18] Wolfram function site[EB/OL]. 2019. <http://functions.wolfram.com/>.

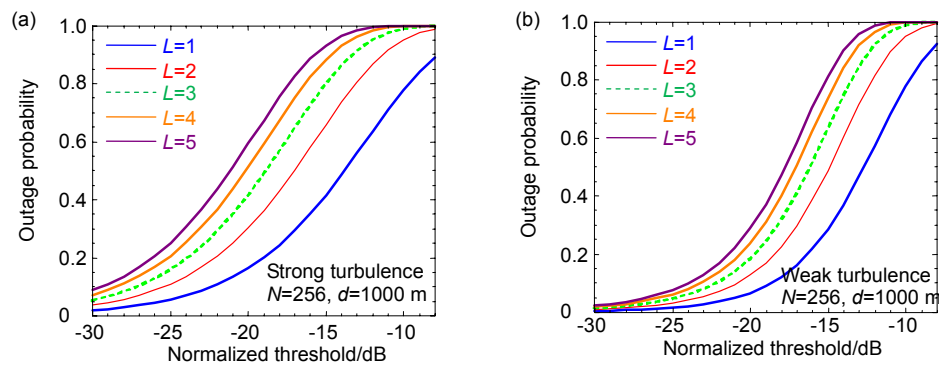
# Performance study of multi-hop coherent OFDM FSO system over M distribution model

Wu Hao<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Deep Sea Manned Vehicles, Wuxi, Jiangsu 214082, China



Outage probability simulation diagram of OFDM FSO system with hop number  $L=1,2,3,4,5$ . (a) Strong turbulence; (b) Weak turbulence

**Overview:** Free space optical (FSO) communication is a bidirectional communication system which is realized by laser signal propagating in atmospheric channel without optical fiber. It can quickly establish communication links in special complex terrain, which is considered as a practical solution to the "last mile problem." Nevertheless, the performance of FSO system is seriously limited by the combined effects of the atmospheric turbulence, atmospheric attenuation, and pointing error. In order to solve this problem, the addition of serial relay technology can effectively alleviate the deterioration of the performance of FSO system. In this paper, we investigate the performance of multi-hop coherent orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) FSO system by using quadrature phase shift keying (QPSK) modulation. A generalized model called M distribution is selected, which is suitable for all categories of turbulence ranging from weak to strong and characterizes other existing statistical models of atmospheric turbulence induced fading as its special case. The system uses decode and forward (DF) relay protocol between the transmitter and receiver of the relay auxiliary link. Considering the joint attenuation effects of atmospheric turbulence, path loss and pointing error on the atmospheric channel fading model, we derive the Meijer G closed-form expressions of outage probability and symbol error rate. Furthermore, the effects of key factors, such as relay link length, the number of relay nodes and subcarriers on the outage and SER performance of OFDM FSO system are analyzed through simulations. It can be concluded from the simulation results that increasing the number of relay nodes and subcarriers, longer relay link, and higher atmosphere turbulence intensity will increase the outage probability and SER of the system. According to the analysis, it is suitable that the number of subcarriers and the relay link length are 256 and 1000 m, respectively. In addition, reducing the normalized threshold can reduce the outage probability of the system. Therefore, controlling the appropriate normalized threshold can improve the stability of communication system. At the same time, increasing the average signal-to-noise ratio can improve the system's symbol error performance. It is also known that when a relay node is added to the communication link, the outage probability and SER of OFDM FSO system increase obviously. With the relay node continuing to join, the downward trend of the outage and symbol error performance is getting smaller. Although the outage and symbol error performance is sacrificed with the increase of relay nodes, it solves the design problems of system links, such as making the transmitter and receiver unable to communicate when there are buildings blocking.

**Citation:** Wu H, Wang Y. Performance study of multi-hop coherent OFDM FSO system over M distribution model[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(1): 190337

Supported by National Natural Science Foundation of China (51704267), Open Fund of State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices (South China University of Technology) (2019-skllmd-13), and the State Key Laboratory of Deep Sea Manned Vehicles (702SKL201702).

\* E-mail: wcy16@cjlu.edu.cn