

# 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析

胡庆松<sup>1</sup> 黄玉划<sup>1</sup> 王俊波<sup>2</sup> 张 净<sup>3</sup> 姜 鹏<sup>2</sup> 苏 芹<sup>2</sup> 宋晓宇<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> 南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016  
<sup>2</sup> 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 210016  
<sup>3</sup> 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212001  
<sup>4</sup> 广西混杂计算与集成电路设计分析重点实验室, 广西 南宁 530006

**摘要** 针对串行译码转发(DF)中继传输方式,研究多跳自由空间光通信(FSO)系统的性能。在研究自由光通信信道衰落模型中,主要考虑大气强湍流引起的衰落以及由未对准偏差和路径损耗共同作用引起的接收机光强度的抖动,并把它们建成一个统计模型。在给定天气状况和未对准条件的情形下,推导串行DF中继传输的多跳FSO的端到端中断概率,得到了端到端中断概率的闭合解析表达式。最终数值结果表明,串行DF多跳传输是一种提高FSO性能的十分有前景的技术。推导的解析表达式和仿真结果吻合得很好。

**关键词** 光通信;自由空间光通信;多跳传输;大气湍流;指向误差;中断概率

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906004

## Performance Analysis of Multi-Hop Free Space Optics over Strong Turbulence

Hu Qingsong<sup>1</sup> Huang Yuhua<sup>1</sup> Wang Junbo<sup>2</sup> Zhang Jing<sup>3</sup> Jiang Peng<sup>2</sup>  
Su Qin<sup>2</sup> Song Xiaoyu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>2</sup> College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>3</sup> School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212001, China

<sup>4</sup> Guangxi Key Laboratory of Hybrid Computation and IC Design Analysis, Nanning, Guangxi 530006, China

**Abstract** The performance of multi-hop free space optics (FSO) is investigated using serial decode-and-forward (DF) relay transmission. While researching the optical channel fading model, a statistical model for the optical intensity fluctuation at the receiver due to the combined effects of strong turbulence-induced fading, misalignment error and pass loss is presented. For given weather and misalignment conditions, the end-to-end outage probability of serial DF multi-hop FSO is derived and a closed-form analytical expression is got. Numerical results show that the serial DF multi-hop transmission is a promising technology to increase the performance of FSO. The derived analytical expression shows excellent agreement with the simulation results.

收稿日期: 2013-03-15; 收到修改稿日期: 2013-05-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(61102068)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(新教师类)(20113218120017)、东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2012D14)、中央高校基本科研业务费专项基金、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj120133)、广西八桂学者资助项目(6011410060101)

**作者简介**: 胡庆松(1987—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: qingsonglin@nuaa.edu.cn

**导师简介**: 王俊波(1979—),男,博士,副教授,主要从事无线光通信、资源分配和网络可靠性等方面的研究。

E-mail: jbwang@nuaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: sxy.psu@gmail.com

**Key words** optical communications; free space optics; multi-hop transmission; atmospheric turbulence; pointing errors; outage probability

**OCIS codes** 060.2605; 010.1330; 010.2180; 010.1310; 010.1290

## 1 引 言

自由空间光通信(FSO)是一种视距(LOS)传输技术,它以可见光为信息载体,通过大气传输数据、图像、语言等信息。使用类似于光纤通信的方式,自由空间光学使用发光二极管(LED)或激光进行数据传输。传统光通信通过光纤电缆引导光束进行通信<sup>[1-2]</sup>,而在自由空间光学中通过空间传导光束进行通信。这些高频率的光束通过自由空间传播,需要精确地到达高灵敏度的接收机镜头上。FSO具有许多优势:1)与无线和微波系统不同,FSO不需要申请频谱许可证,并且与其他系统之间没有干扰<sup>[3]</sup>;2)点对点激光信号很难被阻止,这使得它成为理想的安全通信方式;3)FSO仅以光纤通信的部分发展成本为代价获得可比性极高的数据传输速率,而极其窄的激光光束使得自由空间中在特定位置上提供的光链路数目毫无限制。因此,FSO的技术吸引了很多的应用,包括最后1 mile(1 mile=1.609 km)的接入、光纤备份、无线蜂窝网的回程线路以及灾难恢复<sup>[4]</sup>。

然而,尽管FSO有众多的优点,但它的广泛应用仍然受到制约。信号传输中的大气衰减、链路对准等问题已经成为限制FSO系统通信距离及通信性能的瓶颈。当通信距离超过1 km时,大气湍流会引起衰落,这将导致接收信号产生光强起伏,折射率的变化就是一个典型的结果,该影响因素称为影响FSO系统传输性能的主要因素;此外,由发送机与接收机的未对准偏差所引起的指向误差<sup>[5-6]</sup>对FSO的链路也存在不容忽视的影响。指向误差是由机械的不对准、追踪系统的误差或实际系统的机械振动引起的。理论上,指向误差可以认为是由两个部分组成的:称为瞄准线的固定误差,以及称为抖动的随机误差<sup>[7]</sup>。为了保持发射机和接收机之间的视距,设计者需要提高信噪比(SNR),但这会增加代价和复杂度。对此,许多文献提出了衰减缓解技术,包括纠错校正码<sup>[8-9]</sup>、最大似然序列估计<sup>[10]</sup>、空间分集<sup>[11-13]</sup>、自适应光学<sup>[14]</sup>和部分空间相干性<sup>[15]</sup>。其中,空间分集由于低复杂度而特别引人注目。特别地,协作分集作为实现分集优势的另一个选择最近被引进<sup>[4]</sup>。

协作分集的主要思想是:基于无线射频信道的

观察,源节点的发射信号被其他节点监听,称为伙伴或中继节点。源节点和它的中继节点可以共同处理和传输它们的信息。多跳传输是中继传输方案之一,它采用一个连续配置上的多个中继节点。最近,发射机和接收机间的多跳路由在文献<sup>[16-17]</sup>中也被引进,其目的是增加FSO链路的可靠性,这同时也成功地证明了中继FSO传输的巨大潜力。假设采用放大转发(AF)中继方案<sup>[18]</sup>,中继不用对接收信号执行任何解码,而只需乘以某个合适的能量比例项,然后简单地把它转发给下一个中继。和AF中继方案不一样,当采用译码转发(DF)中继方案时,中继在直接检测后解码信号,用开关键控(OOK)解码,然后传送给下一个中继。这将一直重复直到元数据到达目的节点。对于FSO中的微弱波动,接收强度接近指数正态分布<sup>[19]</sup>。对于强湍流条件,接收强度的分布近似Gamma-Gamma分布。Farid等<sup>[20]</sup>建立了通过大气的点对点通信链路,并且提出了一种形式化方法来联合设计波束宽度和FSO信道编码速率,该信道同时受到湍流和衰落引起的未对准干扰。文献<sup>[18]</sup>研究了一个多跳FSO系统的中断概率,该系统在不考虑指向误差的前提下,分别采用AF和DF中继方案通过强湍流衰落信道进行通信。多跳FSO系统受到大气湍流和指向误差共同影响时的中断性能分析还没有在公开文献中被提出过。

基于此,本文进一步研究受强湍流和未对准引起的衰落影响的多跳FSO系统的中断概率。对多跳FSO的研究不同于文献<sup>[18-21]</sup>的工作,考虑对FSO链路的影响来自三个衰落因素:路径损耗、大气湍流影响和指向误差。在给定大气和未对准衰落统计的情形下,分析信道状态分布,推导了使用串行DF中断传输的多跳FSO的中断概率闭合表达式。

## 2 系统模型

考虑一个DF中继多跳FSO系统,如图1所示,S表示源节点,D表示目的节点, $R_i$ 表示第*i*个( $i = 1, \dots, N$ )中继节点。来自源节点的发射信号在目的节点检测之前通过串行中继传输。在光到达目的节点之前总共有 $N + 1$ 个点对点传输链路,其中 $z_{j-1,i}$ ( $i = 1, \dots, N + 1$ )表示第*i*个点对点传输链路

的距离。不失一般性,在下面的描述中只考虑第  $i$  跳的传输特性。

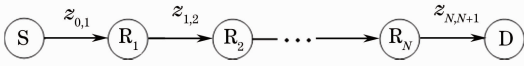


图1 多跳 FSO 系统

Fig. 1 Multi-hop FSO system

假设  $h_i$  是第  $i$  跳信道的衰落。因为受到大气湍流、第  $i$  跳的未对准以及加性噪声的影响,第  $i+1$  个节点的接收信号  $y_i$  在信号强度上有起伏,可以建模为

$$y_i = h_i R_i x_i + n_i, \quad (1)$$

式中  $x_i$  是第  $i$  个路径的传输强度,  $R_i$  表示第  $i$  个接收机的灵敏度,  $n_i$  是信号独立、方差为  $(\sigma_n^i)^2$  的加性高斯白噪声。

大气湍流导致的衰落改变非常缓慢,因此 FSO 信道可以视为准静态信道<sup>[22]</sup>。在该模型中,  $h_i$  的产生因素有三个:路径损耗  $h_p^i$ 、几何扩散和指向误差  $h_a^i$  以及大气湍流  $h_n^i$ 。第  $i$  个信道的状态可以阐述为

$$h_i = h_p^i h_a^i h_n^i. \quad (2)$$

需要注意的是,  $h_p^i$  是确定的量,而  $h_a^i$  和  $h_n^i$  在下面的讨论中将会发现是与分布随机相关的。

考虑使用直接检测信道强度的 OOK 调制,这种调制方式在实际系统中被广泛采用。发射信号是从一个 OOK 星座图中等概率地选取,因此  $x \in \{0, 2P_i^i\}$ ,其中  $P_i^i$  是第  $i$  跳的平均传输光功率。慢衰落信道中的 OOK 信号经过该信道传输后第  $i$  跳链路的接收 SNR 被定义为

$$s(h_i) = R_i' h_i^2, \quad (3)$$

它是随  $h_i$  的影响而随机变化的,其中  $R_i' = 2(P_i^i)^2 R_i^2 / (\sigma_n^i)^2$ 。

## 3 光信道衰落模型

### 3.1 大气损耗

大气中的各种气体、微粒(烟雾、灰尘等)及风雨等天气,使得大气中传输光束会受到吸收和散射的作用<sup>[21]</sup>。激光穿过大气时的衰减可以用指数朗伯-比尔定律描述为<sup>[20]</sup>

$$h_p^i(z_{i-1,i}) = \frac{P(z_{i-1,i})}{P(0)} = \exp(-\sigma_i z_{i-1,i}), \quad (4)$$

式中  $h_p^i(z_{i-1,i})$  是传输距离为  $z_{i-1,i}$  的路径损耗,  $P(z_{i-1,i})$  是在传输距离为  $z_{i-1,i}$  处的激光功率,  $\sigma_i$  是衰减系数<sup>[23]</sup>。衰减  $h_p^i$  在长时间内被看作是一个固定的缩放因子,不具有随机性。它取决于散射粒子的大

小和分布,同时也与传输光束的波长有关。它还可以描述为大气的能见度,而能见度可以从大气中直接检测出来。因此,  $h_p^i$  在计算中作为一个缩放因子是确定的。

### 3.2 大气湍流导致的衰减

FSO 系统的性能受大气湍流影响会产生剧烈波动<sup>[24]</sup>,大气湍流的发生是因为温度的起伏会导致大气折射率的变化。为了确保 FSO 链路的可靠性,首先使用一个有效的湍流概率模型。此处只讨论强湍流的情况。因此由湍流导致的衰减被建模为 Gamma-Gamma 分布,这一分布使用在强湍流中进行建模是十分常见的。

强湍流情形下,光强起伏的概率密度函数可以表示为<sup>[20]</sup>

$$f_{h_n^i}(h_n^i) = \frac{2(\alpha_i \beta_i)^{(\alpha_i + \beta_i)/2}}{\Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} (h_n^i)^{\alpha_i + \beta_i - 1} K_{\alpha_i - \beta_i}(2 \sqrt{\alpha_i \beta_i} h_n^i), \quad (5)$$

式中  $K_{\alpha_i - \beta_i}(\cdot)$  是第二类修正贝塞尔函数<sup>[25]</sup>,  $\Gamma(\cdot)$  是 Gamma 函数,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别是第  $i$  跳散射环境中有效的小尺度和大尺度涡流的数目。根据文献<sup>[18]</sup>,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  可以表示为

$$\begin{cases} \alpha_i = \left\{ \exp \left\{ \frac{0.49(\sigma_R^i)^2}{[1 + 1.11(\sigma_R^i)^{12/5}]^{7/6}} \right\} - 1 \right\}^{-1}, \\ \beta_i = \left\{ \exp \left\{ \frac{0.51(\sigma_R^i)^2}{[1 + 0.69(\sigma_R^i)^{12/5}]^{5/6}} \right\} - 1 \right\}^{-1}, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $(\sigma_R^i)^2$  是里托夫变量,用来刻画光强起伏,定义为

$$(\sigma_R^i)^2 = 1.23k^{7/6} C_n^2(L) z_{i-1,i}^{11/6}, \quad (7)$$

其中  $C_n^2(L)$  是在纬度  $L$  处的折射率结构函数<sup>[26]</sup>,  $k = 2\pi/\lambda$  表示光波的波矢。

### 3.3 指向误差损耗

在 FSO 中,风负载和热膨胀导致的建筑物随机摆动<sup>[27]</sup>,将引起接收机的指向误差和信号衰落。指向精确度是决定链路性能和可靠性的一个重要问题。推导指向误差的统计模型,需考虑的因素有探测器孔径大小、波束宽度和抖动方差。

考虑把接收机的径向位移建模为瑞利分布。  $h_p^i$  的概率分布可以使用文献<sup>[20]</sup>中描述的方法来推导。高斯光束通过大气湍流时的腰束半径  $\omega_z$  近似为

$$\omega_z = \omega_0 \left[ 1 + \epsilon \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

式中  $\omega_0$  是在  $z = 0$  处的腰束半径,  $\epsilon = 1 + 2\omega_0^2/\rho_0^2(z)$ ,  $\rho_0(z) = [0.55C_n^2(L)k^2 z]^{-3/5}$  是相干长度。考虑一个半径为  $a_i$  的圆形检测孔径,以探测器

为原点的几何扩散,在径向位移  $r_i$  处的检测器接收的部分功率可以近似为<sup>[20]</sup>

$$h_p^i(r_i) = A_0^i \exp\left[-\frac{2r_i^2}{(\omega_{\text{zeq}}^i)^2}\right], \quad (9)$$

式中  $A_0^i = [\text{erf}(v_i)]^2$ ,  $(\omega_{\text{zeq}}^i)^2 = \omega_{z_{i-1,i}}^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v_i) / 2v_i \exp(-v_i^2)$ ,  $v_i = \sqrt{\pi} a_i / (\sqrt{2} \omega_{z_{i-1,i}})$ 。注意到  $A_0^i$  是在  $r_i = 0$  处接收的部分功率,  $\omega_{\text{zeq}}^i$  是等效光束的宽度。考虑高度和水平位移是高斯独立同分布的,则  $h_p^i$  的概率密度函数可表示为

$$f_{h_p^i}(h_p^i) = \frac{\gamma_i^2}{(A_0^i)^{\gamma_i^2}} (h_p^i)^{\gamma_i^2-1}, \quad 0 \leq h_p^i \leq A_0^i, \quad (10)$$

式中  $\gamma_i = \omega_{\text{zeq}}^i / (2\sigma_s^i)$  是接收机的等效波束半径和指向误差位移标准差的比值。注意到  $\sigma_s^i$  是抖动标准差。

### 3.4 信道统计模型

第  $i$  跳的信道状态  $h_i = h_a^i h_p^i$ , 因此  $h_i$  的概率分布可以表示如下<sup>[20]</sup>

$$f_{h_i}(h_i) = \int f_{h_i|h_a^i}(h_i | h_a^i) f_{h_a^i}(h_a^i) dh_a^i, \quad (11)$$

式中  $f_{h_a^i}(h_a^i)$  是大气湍流  $h_a^i$  的概率密度函数,  $f_{h_i|h_a^i}(h_i | h_a^i)$  是给定湍流  $h_a^i$  情形下的条件概率密度函数, 表示为

$$f_{h_i|h_a^i}(h_i | h_a^i) = \frac{1}{h_a^i h_p^i} f_{h_p^i}\left(\frac{h_i}{h_a^i h_p^i}\right) = \frac{\gamma_i^2}{(A_0^i)^{\gamma_i^2} h_a^i h_p^i} \left(\frac{h_i}{h_a^i h_p^i}\right)^{\gamma_i^2-1}, \quad 0 \leq h_i \leq A_0^i h_a^i h_p^i, \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式,得

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{\gamma_i^2}{(A_0^i h_p^i)^{\gamma_i^2}} h_p^{\gamma_i^2-1} \int_{h_i/(A_0^i h_p^i)}^{\infty} (h_a^i)^{-\gamma_i^2} f_{h_a^i}(h_a^i) dh_a^i. \quad (13)$$

从(13)式可知,  $f_{h_i}(h_i)$  可以由大气湍流  $f_{h_a^i}(h_a^i)$  的合适模型来确定。对于强湍流,  $f_{h_a^i}(h_a^i)$  是 Gamma-Gamma 分布。把(5)式代到(13)式中,得

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{\gamma_i^2}{(A_0^i h_p^i)^{\gamma_i^2}} h_p^{\gamma_i^2-1} \int_{h_i/(A_0^i h_p^i)}^{\infty} (h_a^i)^{-\gamma_i^2} \frac{2(\alpha_i \beta_i)^{(\alpha_i + \beta_i)/2}}{\Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} (h_a^i)^{\frac{\alpha_i + \beta_i}{2} - 1} K_{\alpha_i - \beta_i}(2 \sqrt{\alpha_i \beta_i h_a^i}) dh_a^i. \quad (14)$$

为了得到闭合解, 将  $K_\nu(x)$  写成与梅耶尔 G-函数  $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$  有关的项<sup>[25,28-29]</sup>,  $K_\nu(x)$  可以写为

$$K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[ \frac{x^2}{4} \middle| \begin{matrix} - \\ (\nu/2), (\nu/2) \end{matrix} \right]. \quad (15)$$

因此, (14)式可以推导为

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{\alpha_i \beta_i \gamma_i^2}{A_0^i h_p^i \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} \left(\frac{\alpha_i \beta_i h_i}{A_0^i h_p^i}\right)^{\frac{\alpha_i + \beta_i}{2} - 1} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i h_i}{A_0^i h_p^i} \middle| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha_i + \beta_i}{2} + \gamma_i^2 \\ -\frac{\alpha_i + \beta_i}{2} + \gamma_i^2, \frac{\alpha_i - \beta_i}{2}, \frac{\beta_i - \alpha_i}{2} \end{matrix} \right]. \quad (16)$$

根据文献[25], (16)式可以进一步简化为

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{\alpha_i \beta_i \gamma_i^2}{A_0^i h_p^i \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i h_i}{A_0^i h_p^i} \middle| \begin{matrix} \gamma_i^2 \\ \gamma_i^2 - 1, \alpha_i - 1, \beta_i - 1 \end{matrix} \right]. \quad (17)$$

(17)式给出了第  $i$  跳信道状态概率分布。

## 4 中断概率分析

大气湍流和指向误差导致 FSO 系统有缓慢变化的衰落。信道状态的改变比信道相干时间缓慢得多。因此, 典型传输速率下, 衰落在几百上千甚至是百万万个连续的比特数内保持不变<sup>[22]</sup>。对这样的信道, 中断概率是合适的评价系统性能的机制。中断概率定义为瞬时 SNR 值降低到一个特定阈值  $s_{\text{th}}$  时的概率, 该阈值表示信道的检测值<sup>[18]</sup>。在此情况

下, 第  $i$  个传输链路等价的点对点中断概率可以表示为

$$p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = \Pr(s_i < s_{\text{th}}), \quad (18)$$

式中  $s_i$  是长度为  $z_{i-1,i}$  的中间链路的 SNR。结合(3)式和(18)式, 中断概率可以推导如下:

$$p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = \Pr[h_i < h_0^i(s_{\text{th}})], \quad (19)$$

式中  $h_0^i = \sqrt{s_{\text{th}}/R_i}$ 。

因此, 中断概率就是在  $h_0^i$  处对  $h_i$  的累加密度函数的评估, 可以表示为

$$p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = \int_0^{h_0^i(s_{\text{th}})} f(h_i) dh_i. \quad (20)$$

把(17)式代入(20)式,得

$$p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = \int_0^{h_0^i(s_{\text{th}})} \frac{\alpha_i \beta_i \gamma_i^2}{A_0^i h_1^i \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i}{A_0^i h_1^i} h_i \left| \begin{matrix} \gamma_i^2 \\ \gamma_i^2 - 1, \alpha_i - 1, \beta_i - 1 \end{matrix} \right. \right] dh_i, \quad (21)$$

根据文献[25,28]可以得到  $p_{\text{out}}^i$  的闭合表达式

$$p_{\text{out}}^i = \frac{\gamma_i^2}{\Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} G_{2,4}^{3,1} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i}{A_0^i h_1^i} h_0^i \left| \begin{matrix} 1, \gamma_i^2 + 1 \\ \gamma_i^2, \alpha_i, \beta_i, 0 \end{matrix} \right. \right]. \quad (22)$$

当采用 DF 中继时,系统的中断性能依赖于每一跳的中断概率。因此,中断概率为

$$P_{\text{out}}(s_{\text{th}}) = \Pr \left[ \bigcup_{i=0}^N (s_i < s_{\text{th}}) \right] = \Pr \left[ \min_{i=0,1,\dots,N} \{s_i\} \leq s_{\text{th}} \right] = 1 - \prod_{i=1}^N \Pr(s_i \geq s_{\text{th}}) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}})]. \quad (23)$$

联合(22)式和(23)式,推导得整个系统的中断概率如下:

$$P_{\text{out}}(s_{\text{th}}) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}})] = 1 - \prod_{i=1}^N \left\{ 1 - \frac{\gamma_i^2}{\Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} G_{2,4}^{3,1} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i}{A_0^i h_1^i} h_0^i \left| \begin{matrix} 1, \gamma_i^2 + 1 \\ \gamma_i^2, \alpha_i, \beta_i, 0 \end{matrix} \right. \right] \right\}. \quad (24)$$

(24)式给出了中继 FSO 系统的中断概率的闭合表达式。通过使用(24)式就可以评估系统的性能。

## 5 数值结果和讨论

FSO 系统的参数列在表 1 中<sup>[20]</sup>。值得注意的是,晴朗天气条件下的点对点光链路影响可以通过两个参数来刻画:折射率结构函数  $C_n^2$  和大气损耗  $h_1$ 。考虑在晴天条件下强湍流的 FSO 链路,假设大气衰减  $h_1$  为 0.44 dB/km,结构常数为  $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,相应的里托夫变量等于 1,衰减  $h_1$  等于 0.9,传输路径是 1 km。另外,在 1 km 处相应的波束半径  $w_c = 2.5$ 。因为参数会随着点对点传输路径的改变而改变,假设整个链路的距离(即源节点和目的节点的距离)是  $D \triangleq \sum_{i=1}^{N+1} z_{i-1,i} = 0, \dots, 20 \text{ km}$ 。另外,连续节点在源节点到目的节点的路径上是等距的,并且假设每一跳的性能都是一样的。不失一般性,假设  $P$  是整个 DF 中继 FSO 系统的传输功率,  $P_i (i = 0, 1, \dots, N)$  和  $P$  有关,对串行中继有  $P_i = P/(N+1)$ 。SNR 阈值假设为  $s_{\text{th}} = 6 \text{ dB}$ 。

图 2 给出了不同中继节点数目下的中断概率随传输功率的变化情况,  $D = 4 \text{ km}$ ,接收半径  $a = 0.1 \text{ m}$ 。作为比较的基准,没有中继的直接传输方案的中断概率也包含在图中。从图 2 可知中断概率随传输信号功率的增加而减小。同时,中断概率也随着中继节点数目的增加而减小,尽管每个节点的传输功率

表 1 系统配置

Table 1 System configuration

Parameter	Value
Responsivity $R / (\text{A/W})$	0.5
Noise standard deviation $\sigma_n / (\text{A/Hz})$	$10^{-7}$
Attenuation coefficient $\sigma / (\text{A/km})$	5
Corresponding jitter standard deviation $\sigma_s / \text{cm}$	30

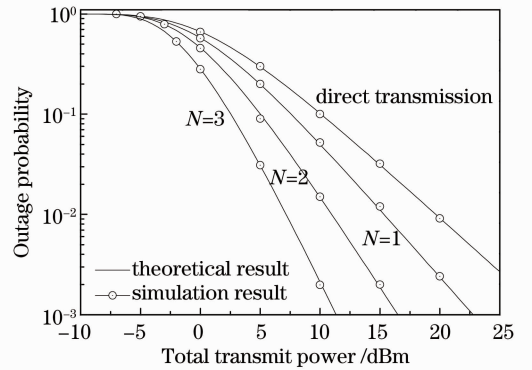


图 2 不同串行中继数目下中断概率与传输功率的关系  
Fig. 2 Outage probability versus transmit power with different number of relay nodes

很低。值得注意的是,和中继传输相比,没有中继节点的直接传输的中断性能最差。另外,可以发现理论结果和仿真结果十分一致。

图 3 给出了不同中继节点下中断概率随接收半径的变化情况,  $D = 4 \text{ km}$ ,  $P = 10 \text{ dBm}$ 。从图 3 可知,中断概率随接收半径  $a$  的增加而减小。同时,中断概率也随中继节点的数目增加而减小。值得注意

的是,相比于中继传输,没有中继节点的直接传输的中断性能仍然最差。另外,仿真结果和理论结果依然十分吻合。

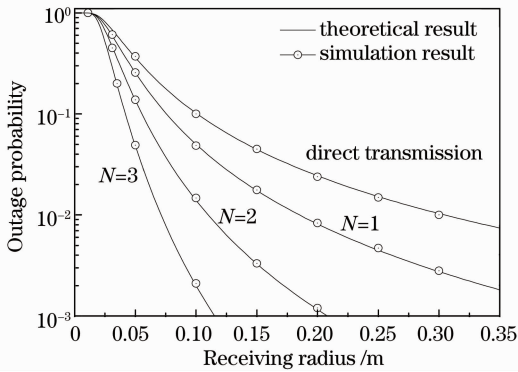


图 3 不同串行中继数目下中断概率与接收半径的关系

Fig. 3 Outage probability versus receiving radius with different number of relay nodes

图 4 展示了不同中继节点数目下中断概率随整个链路距离的变化情况,  $P = 10$  dBm,  $a = 0.1$  m。在图 4 中,可以发现中断概率随整个链路的距离的增加而增加。然后,更多的中继节点可以显著地降低中断概率。因此,串行 DF 多跳传输是一个有望用来增加源节点到目的节点整体链路距离的方法。另外,很容易发现仿真结果与理论结果十分吻合。

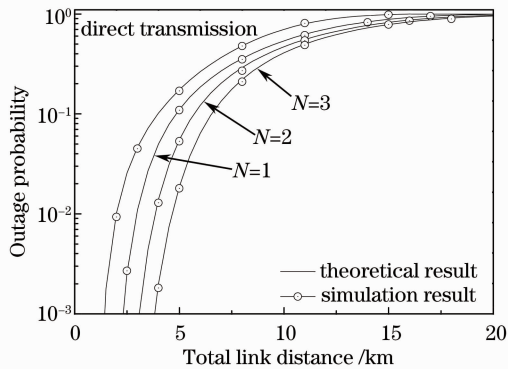


图 4 不同串行中继数目下传输距离与中断概率的关系

Fig. 4 Outage probability versus total link distance with different number of relay nodes

## 6 结 论

针对受强大气湍流和指向误差联合影响的复合衰落信道,研究了采用串行 DF 中继传输的多跳 FSO 的性能。分析了该复合衰落信道下接收 SNR 的概率分布函数。推导了采用串行 DF 中继传输的多跳 FSO 的中断概率性能的理论表达式。证明了指向误差和整个链路距离越大,中断性能越差。在源节点和目的节点间采用更多的中继节点能减轻信

道衰落和整个链路距离的影响。因此,串行 DF 多跳传输是一个可以提高 FSO 性能的很有希望的技术。此外,仿真结果表明闭合理论表达式可精确有效地评估串行译码 FSO 系统中断性能。

## 参 考 文 献

- 1 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *et al.*. Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506004.  
常乐,董毅,孙东宁,等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506004.
- 2 Wang Fu, Wu Chongqing, Liu Lanlan. Active spontaneous emission in erbium-doped fiber with small pulse pump [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706002.  
王甫,吴重庆,刘岚岚. 小信号脉冲抽运时掺铒光纤自发辐射的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0706002.
- 3 J M Kahn, J R Barry. *Wireless infrared communications* [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(2): 265-298.
- 4 M Safari, M Uysal. Relay-assisted free-space optical communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5441-5449.
- 5 H G Sandalidis, T A Tsiftsis. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- 6 D Kedar, S Arnon. Optical wireless communication through fog in the presence of pointing errors [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(24): 4946-4954.
- 7 D K Borah, D G Voelz. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(18): 3965-3973.
- 8 X Zhu, J M Kahn. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 51(8): 1233-1239.
- 9 M Uysal, S M Navidpour, J Li. Error rate performance of coded free-space optical links over strong turbulence channels [J]. *IEEE Communication Letters*, 2004, 8(10): 635-637.
- 10 X Zhu, J M Kahn. Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 51(3): 509-516.
- 11 S G Wilson, M Brandt-Pearce, Q Cao, *et al.*. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(9): 1901-1909.
- 12 S M Navidpour, M Uysal, M Kavehrad. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(8): 2813-2819.
- 13 Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 31(12): 1201003.  
柯熙政,宋鹏,裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 31(12): 1201003.
- 14 Zhijun Zhao, S D Lyke, M C Roggemann. Adaptive optical communication through turbulent atmospheric channels [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 2008, 5432-5436.
- 15 O Korotkova, L C Andrews. A model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in lasercom [J]. *Opt Engng*, 2004, 43(2): 330-341.

- 16 M Karimi, M Nasiri-Kenari. Free space optical communications via optical amplify-and-forward relaying [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(2): 242–248.
- 17 J Akella, M Yuksel, S Kalyanaraman. Error analysis of multi-hop free-space optical communication [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 2005, 3: 1777–1781.
- 18 T A Tsiftsis, H G Sandalidis, G K Karagiannidis. Multi-hop free-space optical communications over strong turbulence channels [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 2006, 6: 2755–2759.
- 19 M A Al-Habash, L C Andrews, R L Philips. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Opt Engng*, 2001, 40(8): 1554–1562.
- 20 A A Farid, S Hranilovic. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(7): 1702–1710.
- 21 Zhu Yaolin, An Ran, Ke Xizheng. Effect of rainfall on wireless laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1206003.  
朱耀麟, 安然, 柯熙政. 降雨对无线激光通信的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206003.
- 22 E J Lee, V W S Chan. Part 1: optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(9): 1896–1906.
- 23 M A Naboulsi, H Sizun, F de Fornel. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. *Opt Engng*, 2004, 43(2): 319–329.
- 24 Li Fei, Hou Zaihong, Wu Yi. Error performance for free space optical communication systems in a real turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906003.  
李菲, 侯再红, 吴毅. 实际大气中无线光通信的系统差错性能[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906003.
- 25 I S Gradshteyn, I M Ryzhik. *Table of Integrals, Series, and Products (7th edition)* [M]. New York: Academic, 2007. 629, 659, 850, 911, 1032.
- 26 X Zhu, J M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(8): 1293–1300.
- 27 S Arnon. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(2): 129–131.
- 28 V S Adamchik, O I Marichev. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in reduce system [C]. *International Conference on Symbolic and Algebraic Computation*, Tokyo, 1990. 212–224.
- 29 A P Prudnikov, Y A Brychkov, O I Marichev. *Integrals and Series: More Special Functions* [M]. London: Gordon and Breach, 1992, 3.

栏目编辑：王晓球