

文章编号 1004-924X(2012)04-0745-07

强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析

王俊波^{1,2*}, 盛明¹, 谢秀秀¹, 焦媛¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016;
2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要:在大气强湍流条件下,对并行中继自由空间光通信系统的中断概率进行了研究。考虑大气衰减、大气湍流和指向误差对自由空间光通信系统传输性能的影响,建立了自由空间光通信系统的复合信道模型。基于此信道模型,推导了并行中继自由空间光通信系统端到端中断概率的解析表达式。最后,通过计算机仿真分析了发送功率、指向误差及通信距离对通信系统中断概率的影响。仿真结果表明,并行中继传输技术可以有效提高自由空间光通信系统的中断性能。此外,所推导中断概率的解析表达式可准确地评估并行中继自由空间光通信系统的传输性能,为未来自由空间光通信系统的设计提供理论依据。

关键词:自由空间光通信;中断概率;并行中继;指向误差;大气湍流

中图分类号:TN929.13 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0745

Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence

WANG Jun-bo^{1,2*}, SHENG Ming¹, XIE Xiu-xiu¹, JIAO Yuan¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: jbwang@nuaa.edu.cn

Abstract: This paper studies the outage probability for parallel relay Free-space Optical(FSO) communication systems under a condition of strong turbulence. By considering the influences of atmospheric attenuation, atmospheric turbulence and pointing errors on the transmission performance of FSO communication systems, this paper establishes a composite channel model. Based on the model, an analytical expression is further derived for the end-to-end outage probability of parallel relay FSO communication systems. Finally, the effects of transmitted powers, pointing errors and communication distances on outage probability are analyzed through computer simulation. Simulation results show that parallel relay transmission is a promising technology to increase the outage performance and the de-

收稿日期:2011-10-13;修订日期:2011-12-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61102068);中国博士后科学基金资助项目(No. 20110490389);东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(No. 2010D01);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)(No. 20113218120017);南京航空航天大学研究生创新基地开放基金资助项目(No. kfj20110213)

rived analytical expression can provide sufficient precision for evaluating the outage performance of parallel relay free-space optical communication systems, which is helpful to the design of future free space optical communication systems.

Key words: free-space optical communication; outage probability; parallel relay; pointing error; atmospheric turbulence

1 引言

自由空间光通信(FSO)又称无线光通信,它是以自由空间作为传输介质来进行光信号传送的通信系统。与传统的无线电通信相比,FSO通信具有安全、架设灵活便捷、高数据传输率、无需频率申请等优点^[1-2]。因此,FSO通信是一个具有极大研究价值的课题,拥有广阔的应用前景和巨大的市场潜力。

目前,有关 FSO 通信的研究仍处于起步阶段,许多关键性的理论和技术问题亟待解决^[3-4]。由于通信环境及通信信道的特殊性,信号传输中的大气衰减、链路对准等问题已经成为限制 FSO 通信系统通信距离及通信性能的瓶颈。当通信距离超过 1 km 时^[3],由大气中局部温度、压力的随机变化引起的大气湍流成为影响 FSO 通信系统传输性能的主要因素。在晴空大气情况下,大气传输环境出现强湍流,其对传输信号的影响服从 Gamma-Gamma 分布^[5]。此外,由发送机与接收机的对准偏差所引起的指向误差^[4]对 FSO 通信的链路也存在不容忽视的影响。为降低 FSO 通信衰落对通信性能的影响,学术界已针对 FSO 通信的衰落抑制技术展开了研究,并提出了最大似然序列估计^[6],协作分集技术^[7],纠错编码^[8],自适应光学^[9],部分空间相干^[10]等技术。值得一提的是,由于具有较低的实现复杂度并可提高通信容量,基于中继传输的协作分集技术已逐渐引起学术界的重视。

中继协作通信是指无线信道中系统的每个移动终端都有一个或多个中继,这些中继在传输自己信息的同时,也可帮助其他中继传输信息。目前,基于中继传输的研究大多是针对无线电通信系统进行的,针对 FSO 通信中继传输技术的研究仍主要集中在系统传输的性能分析上^[11-14]。文

献^[11]研究了基于译码转发(DF)机制下多跳 FSO 通信的误码率,但是信道模型仅考虑了路径损耗因素,没有考虑湍流和指向误差的影响,因而不能很好的贴近实际。文献^[12]在考虑了大气衰减和大气湍流的条件下,研究了 FSO 通信系统中基于直传和中继混合传输情形下采用放大转发(AF)和译码转发(DF)机制的中断概率。需要指出的是,文献^[12]忽略了指向误差对通信系统的影响。文献^[13]分别研究了多跳传输情形下采用 AF 和 DF 机制的中断概率和误码率,但忽视了链路间大气衰减的差异性和指向误差对 FSO 通信系统传输性能的影响,因此,所得到的中断概率表达式缺乏一般性,并不能作为评估系统在不同场景下中断性能的指标。与文献^[13]相比,文献^[14]同时研究了并行中继传输情形下的中断概率,但是仍忽略了指向误差对系统传输性能的影响。需要强调的是,由发送机与接收机未对准引起的指向误差对 FSO 通信质量有着极其重要的影响^[15],因此,在信道模型中不能忽略指向误差因素。

本文在利用并行中继传输的策略下,对 FSO 通信系统的中断概率进行了研究。为了反映实际光信道传播的特性,首先建立了包含大气衰减、大气强湍流和指向误差的 FSO 通信系统复合信道模型;在此模型的基础上,进一步分析并推导出了强湍流条件下 FSO 通信系统端到端中断概率的解析表达式。最后,对解析表达式进行仿真,结果验证了表达式的正确性。

2 系统模型和光信道衰落模型

2.1 系统模型

基于并行中继的 FSO 通信系统如图 1 所示。S 表示源节点,D 为目的节点,源节点通过并行中继 R_i 向目的节点译码转发接收到的信号。不失

一般性,假定有 N 条并行中继路径,并且每条并行中继路径有 2 跳。

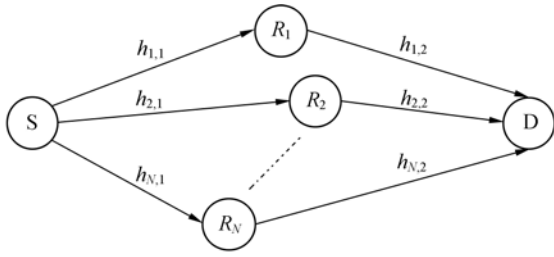


图 1 并行中继 FSO 通信系统图

Fig. 1 Diagram of parallel relay FSO communication system

在图 1 中,假定 $h_{i,j}$ 是第 i 条路径中第 j 跳的信道增益。数学上,第 i 条路径中第 j 跳接收到的信号可表示为

$$y_{i,j} = h_{i,j} R x_{i,j} + n_{i,j}, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}, j \in \{1, 2\}. \quad (1)$$

其中, $x_{i,j}$ 表示第 i 条路径中第 j 跳的发送信号, R 为接收机有效光电流响应率, $n_{i,j}$ 是方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。

根据实际光信道传播的特性,本文考虑由大气衰减、大气湍流和指向误差构成的复合信道。数学上,公式(1)中的信道增益 $h_{i,j}$ 可以表示为

$$h_{i,j} = h_{i,j}^1 h_{i,j}^p h_{i,j}^a, \quad (2)$$

其中, $h_{i,j}^1$, $h_{i,j}^p$ 和 $h_{i,j}^a$ 分别表示第 i 条路径中第 j 跳的大气衰减,指向误差和大气湍流下的信道增益。在光通信中,系统的调制方式通常采用开关键控调制(On-Off Keying, OOK)。在 OOK 调制下,发送端信号通常以等概率发送。若 P_t 是平均发送光功率,则符号功率 $x \in \{0, 2P_t\}$ 。相应地,第 i 条路径中第 j 跳的接收信噪比可表示为

$$\gamma(h_{i,j}) = \frac{2P_t^2 R^2 h_{i,j}^2}{\sigma_n^2}, \quad (3)$$

令 $R_1 \triangleq 2P_t^2 R^2 / \sigma_n^2$, 公式(3)可进一步简化为

$$\gamma(h_{i,j}) = R_1 h_{i,j}^2. \quad (4)$$

2.2 大气衰减模型

光信号在大气中传输时,大气成分对光波的吸收和散射造成能量的衰减称为大气衰减效应。数学上,光功率在大气中的传播衰减可由朗伯-比尔(Beers-Lambert)定律描述为

$$h_{i,j}^1(z_{i,j}) = \frac{P(z_{i,j})}{P(0)} = \exp(-\sigma z_{i,j}), \quad (5)$$

其中, $z_{i,j}$ 表示第 i 条路径中第 j 跳的距离, $h_{i,j}^1$

($z_{i,j}$) 是第 i 条路径中第 j 跳传输距离为 $z_{i,j}$ 处的大气衰减, $P(z_{i,j})$ 是传输距离为 $z_{i,j}$ 处的光功率, $P(0)$ 是光源处的光功率, σ 是大气总的衰减系数^[16]。在实际系统中,大气衰减系数 σ 通常由实验测出,因而大气衰减 $h_{i,j}^1(z_{i,j})$ 不具有随机性,为一个衰减常数。

2.3 大气湍流模型

由文献[17]可知,第 i 条路径中第 j 跳湍流引发的衰减 $h_{i,j}^a$ 是随机的。对于强湍流,光强起伏服从 Gamma-Gamma 分布,其概率密度函数为^[17]

$$f_{h_{i,j}^a}(h_{i,j}^a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\alpha+\beta/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (h_{i,j}^a)^{\alpha+\beta-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_{i,j}^a}), \quad h_{i,j}^a > 0, \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数^[18], $K_\nu(\cdot)$ 是第二类 ν 阶修正贝塞尔函数,并且 α, β 分别是散射环境中有效的小尺度和大尺度涡流的数目^[17]。参数 α 和 β 直接和大气条件有关。在平面波情况下, α 和 β 分别表示为

$$\alpha = \left[\exp\left\{ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right\} - 1 \right]^{-1}, \quad (7-a)$$

$$\beta = \left[\exp\left\{ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right\} - 1 \right]^{-1}, \quad (7-b)$$

其中, σ_R^2 是 Rytov 方差^[19], 它可以表示为

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} d^{11/6}, \quad (8)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, λ 是波长, d 是传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数,它和湍流强度直接有关。

2.4 指向误差模型

参照文献[19]中的研究方法,假设发射光束服从高斯分布,且接收端光信号检测器的半径为 a , 则第 i 条路径中第 j 跳接收端接收到的信号功率可以表示为

$$h_{i,j}^p(r) = A_0 \exp\left\{ -\frac{2r^2}{\omega_{\text{zeq}}^2} \right\}, \quad (9)$$

其中, r 表示径向位移, $v = \sqrt{\pi} a / (\sqrt{2} \omega_{z_{i,j}})$, $\omega_{z_{i,j}}$ 为第 i 条路径中第 j 跳传输距离 $z_{i,j}$ 处的束腰半径, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, $\omega_{\text{zeq}}^2 = \omega_{z_{i,j}}^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ 。由于径向位移 r 服从瑞利分布^[19], $h_{i,j}^p$ 的概率密度函数可表示为^[19]

$$f_{h_{i,j}^p}(h_{i,j}^p) = \frac{\rho^2}{A_0^2} (h_{i,j}^p)^{\rho^2-1}, \quad 0 \leq h_{i,j}^p \leq A_0, \quad (10)$$

其中, $\rho = \omega_{\text{zeq}} / (2\sigma_s)$, σ_s 为接收机指向误差的抖动标准差。

2.5 信道联合衰减模型

数学上, 信道联合衰减 $h_{i,j} = h_{i,j}^l h_{i,j}^p h_{i,j}^a$ 的概率密度函数可以表示为

$$f_{h_{i,j}}(h_{i,j}) = \int f_{h_{i,j}|h_{i,j}^a}(h_{i,j} | h_{i,j}^a) f_{h_{i,j}^a}(h_{i,j}^a) dh_{i,j}^a, \quad (11)$$

其中, $f_{h_{i,j}|h_{i,j}^a}(h_{i,j} | h_{i,j}^a)$ 是条件概率密度函数, 它可表示为

$$f_{h_{i,j}|h_{i,j}^a}(h_{i,j} | h_{i,j}^a) = \frac{1}{h_{i,j}^a h_{i,j}^l h_{i,j}^p} \left(\frac{h_{i,j}}{h_{i,j}^a h_{i,j}^l} \right) = \frac{\rho^2}{A_0^2 h_{i,j}^a h_{i,j}^l} \left(\frac{h_{i,j}}{h_{i,j}^a h_{i,j}^l} \right)^{\rho^2 - 1} \cdot 0 \leq h_{i,j} \leq A_0 h_{i,j}^a h_{i,j}^l, \quad (12)$$

将公式(6)和公式(12)代入公式(11), 得到 $h_{i,j}$ 的概率密度函数为

$$f_{h_{i,j}}(h_{i,j}) = \frac{2\rho^2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{(A_0 h_{i,j}^l)^\alpha \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} (h_{i,j})^{\rho^2 - 1} \times \int_{h_{i,j}/A_0 h_{i,j}^l}^{\infty} (h_{i,j}^a)^{(\alpha+\beta)/2 - 1 - \rho^2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_{i,j}^a}) dh_{i,j}^a, \quad (13)$$

由文献[20]中的公式(14)可知

$$K_\nu(x) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \middle| \begin{matrix} - \\ \nu/2, -\nu/2 \end{matrix} \right], \quad (14)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}$ 是 Meijer G 函数。进一步利用文献[20]中的公式(26), 则公式(13)可化简为

$$f_{h_{i,j}}(h_{i,j}) = \frac{\alpha\beta\rho^2}{A_0 h_{i,j}^l \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta h_{i,j}}{A_0 h_{i,j}^l} \right)^{\frac{\alpha+\beta}{2} - 1} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_{i,j}^l} h_{i,j} \middle| \begin{matrix} 1 - \frac{\alpha+\beta}{2} + \rho^2 \\ -\frac{\alpha+\beta}{2} + \rho^2, \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{\beta-\alpha}{2} \end{matrix} \right]. \quad (15)$$

根据文献[18]中的公式(9.31.5), 公式(15)可进一步化简为

$$f_{h_{i,j}}(h_{i,j}) = \frac{\alpha\beta\rho^2}{A_0 h_{i,j}^l \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_{i,j}^l} h_{i,j} \middle| \begin{matrix} \rho^2 \\ \rho^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right]. \quad (16)$$

3 中断概率分析

中断概率是衡量通信系统性能的常用度量准

则, 其定义为系统信噪比低于某一门限值 s_{th} 时的概率。数学上, 第 i 条路径中第 j 跳的中断概率表示为

$$p_{\text{out}}^{i,j}(s_{\text{th}}) = \Pr(\gamma_{i,j} < s_{\text{th}}), \quad (17)$$

利用公式(4)和公式(17), 并且定义 $h_0 \triangleq \sqrt{s_{\text{th}}/R_1}$, 则第 i 条路径中第 j 跳的中断概率可以表示为

$$p_{\text{out}}^{i,j}(s_{\text{th}}) = \int_0^{h_0(s_{\text{th}})} f_{h_{i,j}}(h_{i,j}) dh_{i,j}, \quad (18)$$

将公式(16)代入公式(18)并且利用文献[18]中的公式(26), 则公式(18)可进一步写为

$$p_{\text{out}}^{i,j}(s_{\text{th}}) = \frac{\rho^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} h_0 \middle| \begin{matrix} 1, \rho^2 + 1 \\ \rho^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right]. \quad (19)$$

当采用并行中继传输技术时, 每条路径的中断概率依赖于相应路径中每跳的中断概率, 则第 i 条路径的中断概率可表示为

$$p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = 1 - \prod_{j=1}^2 [1 - p_{\text{out}}^{i,j}(s_{\text{th}})]. \quad (20)$$

进一步地将公式(19)代入公式(20), 并行中继传输的端对端中断概率可推导得

$$P_{\text{out}}(s_{\text{th}}) = \prod_{i=1}^N p_{\text{out}}^i(s_{\text{th}}) = \prod_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{j=1}^2 [1 - p_{\text{out}}^{i,j}(s_{\text{th}})] \right\}. \quad (21)$$

4 仿真结果

本节通过蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真, 分析了并行中继在 DF 转发模式下, 发送功率、传输距离和抖动标准差等因素对中断概率的影响, 并验证并行中继 FSO 通信系统端到端中断概率解析表达式的准确性。仿真过程中, 首先, 根据复合信道增益 $h_{i,j}$ 的概率密度函数, 应用拒绝法^[21]生成信道增益 $h_{i,j}$, 进而算出第 i 条路径中第 j 跳的接收信噪比; 然后, 与所设定信噪比的门限作比较, 记录第 i 条路径中第 j 跳中断的次数。通过数以千计的仿真场景数, 计算出第 i 条路径中第 j 跳的中断概率, 最后, 得到整个并行中继系统的中断概率。表 1 给出了 FSO 通信系统的参数。不失一般性地, 假定每一信道具有相同的特性, 每一节点发送的功率均相同, 并且所有并行中继节点都位于并行路径的中点。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值
有效光电响应率 $R/(A \cdot W^{-1})$	0.5
源节点到目的节点的距离 z/km	8
接收机直径 $2a/cm$	20
相应的抖动标准差 σ_s/cm	30
噪声标准差 $\sigma_n/(A \cdot Hz^{-1})$	10^{-7}
大气衰减 $h_{i,j}^{i,j}/(dB \cdot km^{-1})$	0.44
大气折射率结构常数 $C_n^2/m^{-2/3}$	5×10^{-14}
Rytov 方差 σ_R^2	1
标准化光束宽度 ω_z/α	25
信噪比门限值 s_{th}/dB	1

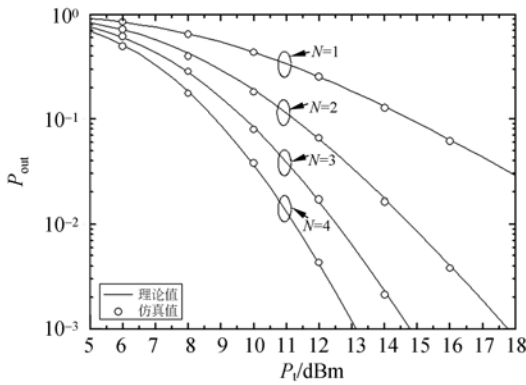


图 2 不同并行中继数目下传输功率与中断概率的关系
Fig. 2 Outage probability versus transmit power with different number of parallel relays

图 2 给出了不同并行中继数目下,FSO 通信系统的中断概率随信号传输功率的关系。从图中可以看出,在总的传输距离和抖动的标准差一定的条件下,随着信号传输功率的增加,接收端输出信噪比也随之增加,使得并行中继 FSO 通信系统的中断概率逐渐减小。还可以看出,在相同的传输功率条件下,随着并行中继数目的增多,FSO 通信系统的中断性能逐渐变好。

图 3 所示为不同并行中继数目下,FSO 通信系统的中断概率与总的传输距离的关系图。从图中可以看出,在信号发送功率和抖动的标准差一定时,随着传输距离的增大,并行中继 FSO 通信系统的中断概率也随之增大。此外,并行中继 FSO 通信系统的中断性能随着并行中继数的增多逐渐变好,即采用并行中继传输技术可以有效地增大 FSO 通信系统的通信距离。

图 4 给出了不同并行中继数目下,抖动的标准

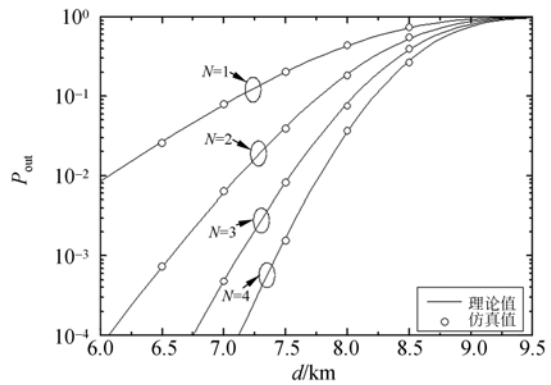


图 3 不同并行中继数目下传输距离与中断概率的关系
Fig. 3 Outage probability versus total link distance with different number of parallel relays

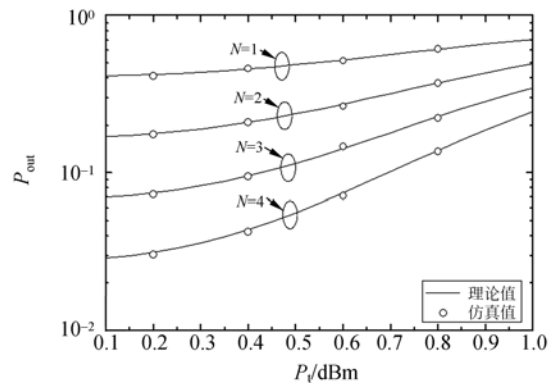


图 4 不同并行中继数目下抖动标准差与中断概率的关系
Fig. 4 Outage probability versus jitter standard deviation with different number of parallel relays

差对 FSO 通信系统中中断概率的影响。从图中可以看出,在信号发送功率和总的传输距离一定时,并行中继 FSO 通信系统的中断概率随着抖动的标准差的增大而增大。此外,还可以看出,在相同抖动标准差情形下,FSO 系统的中断性能随着并行中继数目的增多而提高。

需要注意的是,图 2~4 中并行中继 FSO 通信中断概率的计算机仿真值与理论值相吻合,说明本文提出的并行中继 FSO 通信系统端到端中断概率解析表达式的准确性很好。此外,FSO 通信系统可通过增加并行中继传输路径来降低系统传输的中断概率。

5 结 论

本文研究了强湍流下 FSO 通信系统中并行中继传输的中断性能。考虑到大气衰减、大气湍

流和指向误差对 FSO 通信系统的影响,首先建立了 FSO 通信系统的复合信道模型。在此信道模型的基础上,进一步推导出采用并行中继的 FSO 通信系统端到端中断概率的解析表达式。最后,通过计算机仿真分析了发送功率、指向误差及通信距离对 FSO 通信系统中断概率的影响。仿真结果表明,信号发射功率越大,中断概率越小;通

信距离越长,抖动标准差越大,系统的中断性能越差;并行中继传输技术可以有效提高 FSO 通信系统的中断性能。值得一提的是,并行中继 FSO 通信中断概率的计算机仿真值与理论值相吻合,说明本文提出的并行中继 FSO 通信系统端到端中断概率解析表达式具有很好的准确性。

参考文献:

- [1] NOOR N H M, NAJI A W, AL-KHATEEB W. Theoretical analysis of multiple transmitters/receivers on the performance of free space optics (FSO) link [C]. *IEEE International Conference on Space Science and Communication*, 2011:291-295.
- [2] BEKKALI A, TIEN D P, KAZAURA K, *et al.*. Performance analysis of SCM-FSO links for transmission of CDMA signals under Gamma-Gamma turbulent channel [C]. *IEEE Military Communications Conference*, 2009:1-5.
- [3] 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.
- [4] GAPPMAIR W, HRANILOVIC S, LEITGEB E. OOK performance for terrestrial FSO links in turbulent atmosphere with pointing errors modeled by Hoyt distributions [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011,15(8):875-877.
- [5] BERNHARD E. Simplified channel model for simulation of free-space optical communications [J]. *Optical Communications Network*, 2010,2(5):293-304.
- [6] ZHU X, KAHN J M. Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2003,51(3):509-516.
- [7] HAN L Q, WANG Q, KATSUNORI S. Performance of free space optical communication through gamma-gamma turbulence channels with spatial diversity [C]. *International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, 2010,3:109-112.
- [8] SANDALIDIS H G. Coded free-space optical links over strong turbulence and misalignment fading channels [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011,59(3):669-674.
- [9] 韩立强,王祁,信太克归,等. 基于自适应光学补偿的自由空间光通信系统性能研究[J]. *应用光学*, 2010,31(2):301-304.
- HAN L Q, WANG Q, SHIDA K, *et al.*. Free space optical communication based on adaptive optics compensation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010,31(2):301-304. (in Chinese)
- [10] 步青华,王海燕,李相银. 部分相干平顶光束在大气湍流中空间相干性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2009,4(1):13-21.
- BU Q H, WANG H Y, LI X Y. Property of spatial degree of coherence of partially coherent flat-topped beams through atmospheric turbulence [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009,4(1):13-21. (in Chinese)
- [11] AKELLA J, YUKSEL M, KALYANARAMAN S. Error analysis of multi-hop free-space optical communication [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 2005,3:1777-1781.
- [12] KARIMI M, NASIRI-KENARI M. Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications [J]. *IET Communications*, 2010,4(12):1423-1432.
- [13] TSIFTSIS T A, SANDALIDIS H G, KARAGIANNIDIS G K, *et al.*. Multihop free-space optical communications over strong turbulence channels [C]. *IEEE International Conference on Communications, Istanbul*, 2006:2755-2759.
- [14] SAFARI M, UYSAL M. Relay-assisted free-space

- optical communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7 (12): 5441-5449.
- [15] SHLOMI A. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems [J]. *Optical Letters*, 2003, 28(2): 129-131.
- [16] MAHER A N, HERVE S, FREDERIQUE F. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2): 319-329.
- [17] WANG Z X, ZHONG W, DFU S N, *et al.*. Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(6): 277-285.
- [18] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. *Table of Integrals, Series, and Products, 7th ed* [M]. New York: Academic Press, 2008.
- [19] 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.
- [20] ADAMCHIK V S, MARICHEV O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in reduce system [C]. *In Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, Tokyo, Japan, 1990*: 212-224.
- [21] ROBERT C P, CASELLA G. *Monte Carlo Statistical Methods, 2nd ed* [M]. New York: Springer-Verlag, 2004.

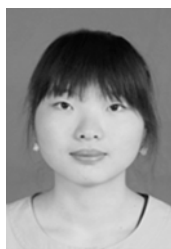
作者简介:



王俊波(1979—),男,安徽合肥人,博士后,副教授,硕士生导师,2003年于合肥工业大学获工学学士学位,2008年于东南大学通信与信息系统专业(硕博连读)获博士学位。主要从事无线光通信、无线通信中的资源分配等方面的研究。E-mail: jbwang@nuaa.edu.cn



盛明(1986—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,2010年于安徽农业大学获得工学学士学位,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: shengming1986@126.com



谢秀秀(1988—),女,安徽淮南人,硕士研究生,2010年于安徽大学获得工学学士学位,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: xiexiuxiu09@126.com



焦媛(1987—),安徽宿州人,硕士研究生,2009年于中南民族大学获得工学学士学位,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: jannayuan@yahoo.com.cn

(本栏目编辑:曹金)