

全光双跳自由空间光通信系统的性能研究

韩立强 游雅晖

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 给出了一种全光双跳自由空间光通信(FSO)系统的基本结构,建立了包含大气损耗、大气湍流和瞄准误差的复合衰落信道模型,考虑背景噪声和放大器自发辐射噪声对系统性能的影响,推导了在全信道状态信息时,采用副载波强度调制全光中继系统的中断概率和误码率闭合表达式,对比分析了全光双跳 FSO 与直传链路的中断概率以及信噪比、源节点发射的光子数、光自由度等参数对系统中断概率及误码率的影响。仿真结果表明,全光双跳放大转发中继能够明显改善系统的性能。

关键词 大气光学; 自由空间光通信; 全光双跳; 复合衰落信道模型; 中断概率; 误码率

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.050101

Performance Analysis of All-Optical Dual-Hop Free-Space Optical Communication Systems

Han Liqiang You Yahui

School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The fundamental structure of all-optical dual-hop free-space optical communication (FSO) system is presented and the composite fading channel model which includes atmospheric loss, atmospheric turbulence and pointing errors is established. In the full channel state information relaying, subcarrier intensity modulation is adopted. The closed-form expressions for outage probability and bit-error rate (BER) of dual-hop FSO systems are derived, based on the effects of background noise and amplified spontaneous emission noise. Then the outage probability of dual-hop FSO system is compared with that of the direct link. The effects of the parameters, such as signal-to-noise ratio, the average transmitted photon count of the source node (SN) and optical degree-of-freedom, on the outage probability and bit-error rate are also researched. The results show that all-optical dual-hop relaying can significantly improve the performance of the systems.

Key words atmospheric optics; free-space optical communication; all-optical dual-hop; composite fading channel model; outage probability; bit-error rate

OCIS codes 010.1330; 060.1155; 060.2605

1 引言

自由空间光通信(FSO)具有工作频率高、方向性强、传输码率高、天线尺寸小、保密性强等优点,是进行空间高速率通信的绝佳选择^[1]。然而,使用激光或发光二极管的 FSO 系统都需要经过大气传输。大气效应对系统性能的影响随着链路距离增加而增大,因此限制了自由空间光通信的传输距离。为克服这种限制,研究者提出多种 FSO 系统的衰落补偿技术,例如自适应光学^[2]、最大似然序列探测、空间分集、协作分集^[3]、多跳传输等。其中中继辅助技术作为一种流行的协作分集技术在 FSO 系统中被广泛研究。中继辅助传输系统可以提供一个虚拟的多孔径系统,从而实现多输入、多输出技术优势。

很多文献对采用不同信道模型的中继辅助 FSO 系统的传输性能做了研究,包括串行中继和并行中继的不同转发模式,即放大转发中继、解码转发中继、再生转发中继。Kashani 等^[4]推导了在对数正态分布湍流

收稿日期: 2015-11-20; 收到修改稿日期: 2015-12-13; 网络出版日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61107039)

作者简介: 韩立强(1976—),男,博士,副教授,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: ysdxh1q@163.com

信道中多跳并行中继的中断概率表达式,并且研究了在对数正态分布湍流信道中,采用二进制脉冲位置调制的并行中继和串行中继的中继器最优位置和分集增益^[5]。Abou-Rjeily^[6]研究了在 Gamma-Gamma 信道中,采用解码转发协作协议可实现分集阶数;Peppas 等^[7]推导了采用双跳放大转发中继的 FSO 在 Gamma-Gamma 大气湍流信道下,考虑闪烁和瞄准误差联合效应时的遍历容量。

以上研究有一个共同点:需要光电或电光转换。由此需要在每个中继中提供高速的电子、光电产品,模拟增益单元和数字控制单元,而这些处理过程在传输速率为 Gb/s 的链路上实现已经非常困难,对于目前几十 Gb/s 的 FSO 系统来说更难实现。为避免复杂的光电、电光转换,全光中继技术在近几年被提出,这种中继可以高速有效地执行任务而不需要复杂的光电或电光处理过程。Kazemlou 等^[8]最早提出全光中继技术,他考虑了固定增益的光放大器和光再生器,并通过 Monte Carlo 仿真研究了系统误码率(BER)性能;Bayaki 等^[9]提出了采用掺铒光纤放大器的全光中继系统,考虑各种参数及噪声的影响,建立固定增益中继及变化增益中继的准确信噪比模型,对比分析了采用光放大转发中继与电放大转发中继的中断概率;Yang 等^[10]研究了伴随瞄准误差的强湍流信道全光放大转发中继的信噪比、误码率和平均容量;Trinh 等^[11]将光放大转发中继技术与波分复用技术结合用于 FSO 系统;Kashani 等^[12]研究了在中继分别获得全部和半盲信道状态信息时全光双跳放大转发 FSO 的信噪比与中断概率。

本文主要研究全光双跳放大转发中继 FSO 的中断概率和误码率。采用 Gamma-Gamma 湍流模型,建立包含大气损耗、大气湍流和瞄准误差的复合衰落信道模型,考虑背景噪声和放大器自发辐射噪声对系统性能的影响,推导出中继获得全部信道状态信息时系统的中断概率和误码率。

2 系统和信道模型

2.1 系统模型

FSO 通信系统采用副载波强度调制,由一个源节点(SN)、一个目的节点(DN)和一个中继节点(RN)组成,每一个节点只有一个接收孔径或发射孔径,如图 1 所示。源节点到中继节点距离是 z_1 ,中继节点到目的节点距离是 z_2 ,总传输距离是 z ,即 $z = z_1 + z_2$ 。 h_{SR} 表示源节点到中继节点的信道衰落, h_{RD} 表示中继节点到源节点的信道衰落。在全部信道状态信息中继的情况下,源节点到中继节点链路的瞬时信道状态信息在中继中是可用的,并利用瞬时信道状态信息通过自适应增益控制器来计算放大器的增益。在全光中继节点中,使用掺铒光纤放大器放大接收信号,如图 2 所示。其中前置滤波器和后置滤波器用来降低光放大器的背景噪声和自发辐射噪声。文中忽略了热噪声,只考虑各节点的背景噪声和放大器的自发辐射噪声。

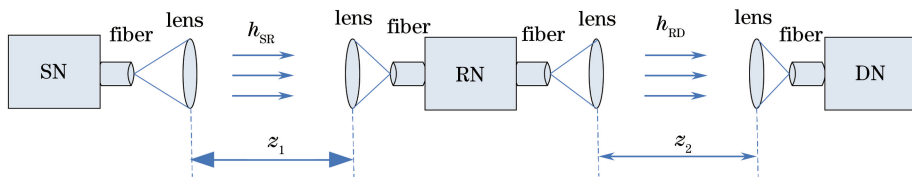


图 1 全光双跳 FSO 系统

Fig. 1 Dual-hop FSO system with all-optical relay

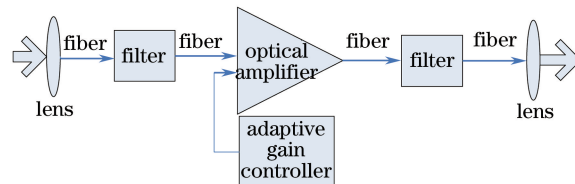


图 2 全光中继终端方框图

Fig. 2 Block diagram of an all-optical relay terminal

整个链路数学模型如图 3 所示,采用光子计数方法,假设源节点发射光子数为 y_s ,平均值为 m_1 ,那么中继节点接收的光子数为

$$y_R = h_{SR}y_S + n_R, \quad (1)$$

式中 n_R 代表中继节点的背景噪声。利用负二项分布建模,平均光子数为 m_R 。

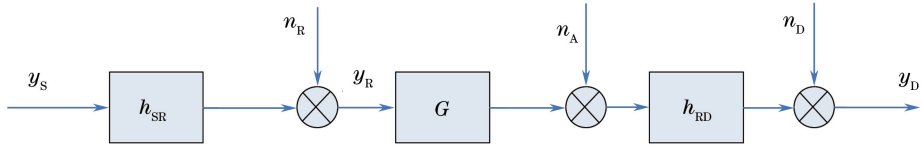


图3 系统总的数学模型

Fig. 3 Mathematical model for the system

假设中继节点发射到目的节点的平均光子数为 m_2 ,光放大器的放大增益为 G ,放大器自发辐射噪声为 n_A ,其光子数为 $m_{ASE} = n_{SP}(G-1)$, n_{SP} 为光放大器的自发辐射系数,取值为 1,则目的节点接收到的光子数为

$$y_D = h_{RD}(y_R G + n_A) + n_D, \quad (2)$$

式中 n_D 为目的节点背景噪声。将(1)式代入(2)式得

$$y_D = h_{RD}h_{SR}y_S G + h_{RD}n_R G + h_{RD}n_A + n_D, \quad (3)$$

其中 $G = m_2 / (h_{SR}m_1 + m_R)$ 。

2.2 信道模型

建立的复合衰落信道模型,包括大气损耗、大气湍流和瞄准误差,因此(1)式中的 h_{SR} 可以表示为

$$h_{SR} = h_{1,i}h_{1,s}h_{1,p}, \quad (4)$$

式中 $h_{1,i}$ 代表大气损耗,可以记为^[13]

$$h_{1,i}(z_1) = \exp[-10^{(\sigma_1^2/10)} z_1], \quad (5)$$

其中 σ_1^2 为大气衰落系数; $h_{1,s}$ 为大气湍流。在 Gamma-Gamma 湍流模型下,其概率密度函数为^[14]

$$f_{h_{1,s}}(h_{1,s}) = \frac{2(\alpha_1\beta_1)^{(\alpha_1+\beta_1)/2}}{\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\beta_1)} h_{1,s}^{(\alpha_1+\beta_1)/2} K_{\alpha_1-\beta_1}(2\sqrt{\alpha_1\beta_1 h_{1,s}}), \quad (6)$$

式中 $\alpha_1 = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_1^2}{(1+1.11\sigma_1^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$, $\beta_1 = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_1^2}{(1+0.69\sigma_1^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}$, 其中 σ_1^2 为 Rytov 方差; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_\nu(\cdot)$ 为 ν 阶第二类修正贝塞尔函数; $h_{1,p}$ 表示瞄准误差,其概率密度函数为^[14]

$$f_{h_{1,p}}(h_{1,p}) = \frac{\xi_1^2}{A_{0,1}} h_{1,p}^{\xi_1^2-1}, 0 < h_{1,p} \leq A_{0,1}, \quad (7)$$

式中 $A_{0,1} = [\text{erf}(v_1)]^2$, $\xi_1 = \frac{\omega_{z,1,\text{eq}}}{2\sigma_s}$, $\omega_{z,1,\text{eq}}^2 = \omega_{z,1}^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v_1) / [2v_1 \exp(-v_1^2)]$, $v_1 = \sqrt{\pi} r_1 / (\sqrt{2}\omega_{z,1})$, 其中 $\text{erf}(\cdot)$ 为误差补函数; $\omega_{z,1,\text{eq}}$ 为接收器中等价束宽; σ_s 为接收器中抖动标准差。

由(4)式可知,源节点到中继节点信道衰落 h_{SR} 概率密度函数为

$$f_{h_{SR}}(h_{SR}) = \int [f_{h_{SR}|h_{1,s}}(h_{SR}|h_{1,s}) f_{h_{1,s}}(h_{1,s})] dh_{1,s}, \quad (8)$$

将(5)~(7)式代入(8)式,可得

$$f_{h_{SR}}(h_{SR}) = \frac{\alpha_1\beta_1\xi_1^2}{A_{0,1}h_{1,i}\Gamma(\alpha_1)\Gamma(\beta_1)} \times G_{3,0}^{3,0} \left[\frac{\alpha_1\beta_1}{A_{0,1}h_{1,i}} h_{SR} \left| \begin{matrix} \xi_1^2 \\ \xi_1^2 - 1, \alpha_1 - 1, \beta_1 - 1 \end{matrix} \right. \right], \quad (9)$$

式中 $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 为 Meijer G 函数^[15]。

3 系统性能

3.1 信噪比

由(3)式可知,源节点到目的节点信噪比 γ 为

$$\gamma = \frac{a^2}{a + Mb(1+b) + 2ab}, \quad (10)$$

式中 $a = Gh_{\text{SR}}h_{\text{RD}}m_1$; $b = m_{\text{R}} + Gh_{\text{RD}}m_{\text{R}} + h_{\text{RD}}m_{\text{ASE}}$ 。将 $G = \frac{m_2}{(h_{\text{SR}}m_1 + m_{\text{R}})}$ 代入(10)式,可得

$$\gamma = (2\gamma_1^{-1} + M\gamma_1^{-2} + \gamma_2^{-1})^{-1}, \quad (11)$$

其中 γ_1 为源节点到中继节点的平均信噪比; γ_2 为中继节点到目的节点的平均信噪比; M 为光学自由度。并且 $\gamma_1 = m_1 h_{\text{SR}}$, $\gamma_2 = m_2 h_{\text{RD}}$, 因此由(9)式得 γ_1 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{\alpha_1 \beta_1 \xi_1^2}{m_1 A_{0,1} h_{1,1} \Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \gamma_1 \left| \begin{matrix} \xi_1^2 \\ \xi_1^2 - 1, \alpha_1 - 1, \beta_1 - 1 \end{matrix} \right. \right], \quad (12)$$

同理, γ_2 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\alpha_2 \beta_2 \xi_2^2}{m_2 A_{0,2} h_{2,1} \Gamma(\alpha_2) \Gamma(\beta_2)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha_2 \beta_2}{m_2 A_{0,2} h_{2,1}} \gamma_2 \left| \begin{matrix} \xi_2^2 \\ \xi_2^2 - 1, \alpha_2 - 1, \beta_2 - 1 \end{matrix} \right. \right]. \quad (13)$$

3.2 中断概率

给定了信噪比阈值 γ_{th} , 那么全光中继系统总中断概率为

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma \leq \gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\infty} \Pr(\gamma \leq \gamma_{\text{th}} | \gamma_1) f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1, \quad (14)$$

根据条件概率, 将(11)式代入(14)式可以得到

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \int_0^{\infty} \Pr[(2\gamma_1^{-1} + M\gamma_1^{-2} + \gamma_2^{-1})^{-1} \leq \gamma_{\text{th}} | \gamma_1] f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 = \\ &\int_0^{\gamma^*} \Pr[\gamma_2 \geq (\gamma_{\text{th}}^{-1} - 2\gamma_1^{-1} - M\gamma_1^{-2})^{-1} | \gamma_1] f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \\ &\int_{\gamma^*}^{\infty} \Pr[\gamma_2 \leq (\gamma_{\text{th}}^{-1} - 2\gamma_1^{-1} - M\gamma_1^{-2})^{-1} | \gamma_1] f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 = \\ &\int_0^{\gamma^*} 1 \cdot f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_{\gamma^*}^{\infty} \Pr[\gamma_2 \leq (\gamma_{\text{th}}^{-1} - 2\gamma_1^{-1} - M\gamma_1^{-2})^{-1} | \gamma_1] f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1. \end{aligned} \quad (15)$$

由(12)式可知 γ_1 的累积分布函数为

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \int_0^{\gamma} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1, \quad (16)$$

即

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \int_0^{\gamma} \frac{\alpha_1 \beta_1 \xi_1^2}{m_1 A_{0,1} h_{1,1} \Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \gamma_1 \left| \begin{matrix} \xi_1^2 \\ \xi_1^2 - 1, \alpha_1 - 1, \beta_1 - 1 \end{matrix} \right. \right] d\gamma_1, \quad (17)$$

根据文献[16]

$$\int_0^y x^{a-1} G_{p,q}^{m,n} \left[wx \left| \begin{matrix} a_p \\ b_q \end{matrix} \right. \right] dx = y^a G_{p+1,q+1}^{m,n+1} \left[wy \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, 1 - \alpha, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, -\alpha, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right], \quad (18)$$

以及

$$Z^k G_{p,q}^{m,n} \left(Z \left| \begin{matrix} a_p \\ b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p,q}^{m,n} \left(Z \left| \begin{matrix} a_p + k \\ b_q + k \end{matrix} \right. \right), \quad (19)$$

可得 γ_1 的累积分布函数为

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \left| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right. \right], \quad (20)$$

则

$$\int_0^{\gamma^*} 1 \cdot f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 = F_{\gamma_1}(\gamma^*) = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma^*}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \left| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right. \right]. \quad (21)$$

令 $x = \exp(-\gamma_1)$, 并将(15)式用高斯公式展开可得

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} = & \rho_1 G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma^*}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right] + \frac{\rho_1 \rho_2 \alpha_1 \beta_1 \exp(-\gamma^*)}{2m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \sum_{t=1}^{N_p} \omega_t \times \\
& G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_2 \beta_2 \varphi_1(-\ln x_t)}{m_2 A_{0,2} h_{2,1}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_2^2 + 1 \\ \xi_2^2, \alpha_2, \beta_2, 0 \end{matrix} \right] \times \\
& G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1 (-\ln x_t)}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \middle| \begin{matrix} \xi_1^2 \\ \xi_1^2 - 1, \alpha_1 - 1, \beta_1 - 1 \end{matrix} \right] \times \frac{1}{x_t}, \quad (22)
\end{aligned}$$

其中 $\gamma^* = \frac{M}{(\sqrt{1+M\gamma_{\text{th}}^{-1}} - 1)}$, $\rho_i = \frac{\xi_i^2}{\Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)}$, $i \in \{1, 2\}$, $\varphi_1(\gamma_1) = (\gamma_{\text{th}}^{-1} - 2\gamma_1^{-1} - M\gamma_1^{-2})^{-1}$ 。 ω_t 为 N_p

阶高斯公式的权重; x_t 为 N_p 阶高斯公式的节点。

根据文献[17]可求出当 $N_p = 21$ 时高斯公式各节点以及权重系数。

对于直传链路系统, 给定了信噪比阈值 γ_{th} , 那么系统总中断概率为

$$P_o = \Pr(\gamma \leq \gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1, \quad (23)$$

其中 $h_{1,1}(z) = \exp[-10(\sigma_1^{1/10}) \times 2z_1]$ 。

由(16)和(20)式可知

$$P_o = F_{\gamma_1}(\gamma_{\text{th}}) = \frac{\xi_1^2}{\Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1 \gamma_{\text{th}}}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \middle| \begin{matrix} 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right]. \quad (24)$$

3.3 误码率

系统总误码率为 $P_e = P_{e1} + (1 - P_{e1})P_{e2} = P_{e1} + P_{e2} - P_{e1}P_{e2}$, 其中 P_{e1} 与 P_{e2} 分别为第一级跳和第二级跳误码率。通常 P_{e1} 与 P_{e2} 值较小, 因此将等式中 $P_{e1}P_{e2}$ 忽略不计, 即系统总误码率为 $P_e \approx P_{e1} + P_{e2}$ 。

由于文中采用副载波强度调制, 所以采用相移键控方法来计算系统误码率^[18], 则系统第一级跳的误码率为

$$P_{e1} = E_X \left[F_{\gamma_1} \left(\frac{X^2}{2} \right) \right], \quad (25)$$

其中 X 为标准正态分布, $E(\cdot)$ 为数学期望。将 $\frac{X^2}{2}$ 代入(20)式, 根据标准正态分布概率密度函数以及文献[16]中 Meijer G 函数性质(07.34.21.0088.01), 可求得

$$P_{e1} = \frac{\xi_1^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} G_{3,4}^{3,2} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \middle| \begin{matrix} 0.5, 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right], \quad (26)$$

P_{e2} 具有相似的表达式, 那么系统总的误码率为

$$\begin{aligned}
P_{e1} = & \frac{\xi_1^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha_1) \Gamma(\beta_1)} G_{3,4}^{3,2} \left[\frac{\alpha_1 \beta_1}{m_1 A_{0,1} h_{1,1}} \middle| \begin{matrix} 0.5, 1, \xi_1^2 + 1 \\ \xi_1^2, \alpha_1, \beta_1, 0 \end{matrix} \right] + \\
& \frac{\xi_2^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha_2) \Gamma(\beta_2)} G_{3,4}^{3,2} \left[\frac{\alpha_2 \beta_2}{m_2 A_{0,2} h_{2,1}} \middle| \begin{matrix} 0.5, 1, \xi_2^2 + 1 \\ \xi_2^2, \alpha_2, \beta_2, 0 \end{matrix} \right]. \quad (27)
\end{aligned}$$

4 仿真结果

该系统参数如表 1 所示。为了方便计算, 假设全光双跳 FSO 系统的每一级跳的传输距离相等, 即源节点到中继节点距离等于中继节点到目的节点距离。为了保证系统平均发射功率恒定, 一般假设源节点和中继节点发射的平均光子数相等。

在图 4 中对比分析了全光中继 FSO 系统和直传链路系统的中断概率。通过图 4 可以看出中断概率随着链路总传输距离和湍流强度的增大而增大。当链路传输距离较小时, 采用全光放大转发中继不能改善 FSO 系统的可靠性; 当传输距离较大时, 采用全光放大转发(OAF)中继可以明显改善系统的性能。例如在弱湍流情况下, 当传输距离小于 4.3 km 时, 直传链路的中断概率比全光中继 FSO 小; 当传输距离大于

4.3 km时,全光中继 FSO 的中断概率性能明显优于直传链路。这是因为中继会引入背景噪声和放大器自发辐射噪声。传输距离较小时,这些噪声相对于系统性能影响较大;当距离较大时,这些噪声对性能的削减效应被中继协作分集增益抵消。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of the system

Parameter	Value	
Atmospheric attenuation coefficient σ_1^1 /(dB/km)	0.43	
Rytov variance σ_1^2	weak turbulence	0.4
	middle turbulence	1
	strong turbulence	4
Normalized beam width $w_{z,1}/r_1$	16	
Normalized jitter σ_s/r_1	4	
Optical degree-of-freedom M	100	
Average transmitted photon count of the SN m_1	5×10^5	
Average transmitted photon count of the RN m_2	5×10^5	
Normalized threshold γ_{th} / dB	0	
Order of the Gauss's formula N_p	21	

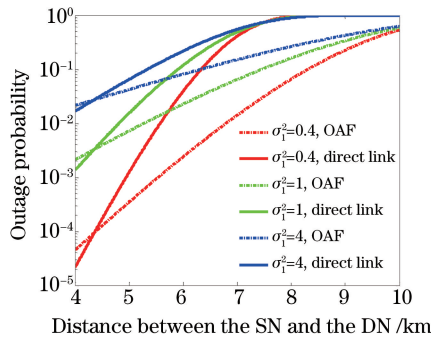


图 4 全光双跳 FSO 系统和直传链路系统的中断概率

Fig. 4 Outage probability of all-optical dual-hop FSO systems and direct link

同时仿真分析了系统的一些参数对系统中断概率影响,如图 5 分别描述了归一化门限、源节点发射平均光子数、光自由度对系统中断性能影响。从图中可以看出,当归一化门限、传输距离或者光自由度增大,都将导致中断概率增大,降低系统的可靠性。但增加源节点发射的平均光子数时,系统的中断概率反而会减小;由于源节点发射的平均光子数与系统平均发射功率成正比,系统性能会随着平均发射功率的增大而变得更可靠。

图 6~9 仿真分析了系统的误码率与传输距离、湍流强度、源节点发射的平均光子数、归一化束宽及归一化抖动标准差的关系。从图 6~9 中可以看出,随着传输距离、湍流强度或归一化抖动标准差增大,系统误码率随之增大。但是误码率随着源节点发射的平均光子数增大而减小,表示误码率随着系统的平均发射功率

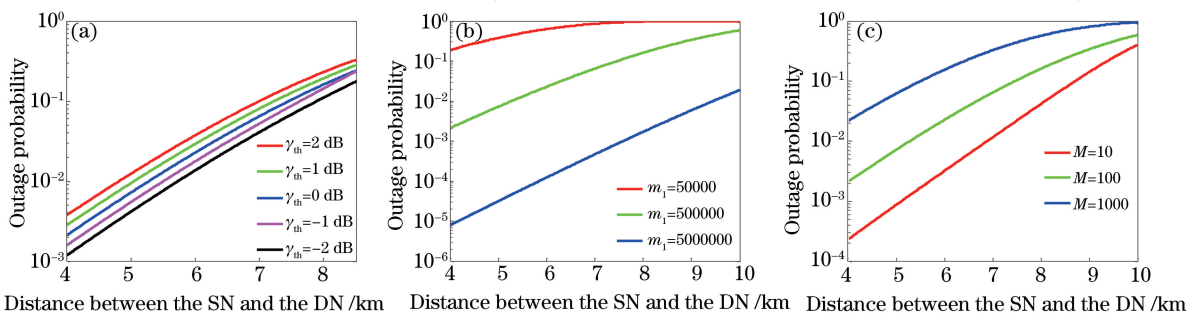


图 5 (a) 归一化门限、(b) 源节点发射平均光子数、(c) 光自由度不同时中断概率与传输距离关系

Fig. 5 Outage probability versus transmission distance with different

(a) normalized thresholds, (b) average transmitted photon counts of the SN and (c) optical degree-of-freedom

增大而减小。当传输距离为 4 km 时,误码率随着波束宽度增大而减小;但当波束宽度增大到一定程度时,随着波束宽度增大,误码率反而增加,即通过优化波束宽度值可以使系统误码率达到最小,系统性能达到最优。例如源节点发射平均光子数为 5×10^4 、 5×10^5 、 5×10^6 时,波束宽度最优值分别为 12.9、14.4、14.9。

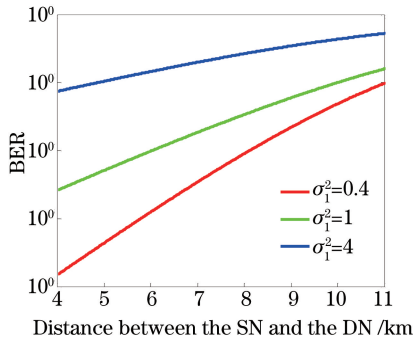


图 6 在不同的湍流强度条件下,误码率与传输距离的关系
Fig. 6 BER versus transmission distance with different turbulence strengths

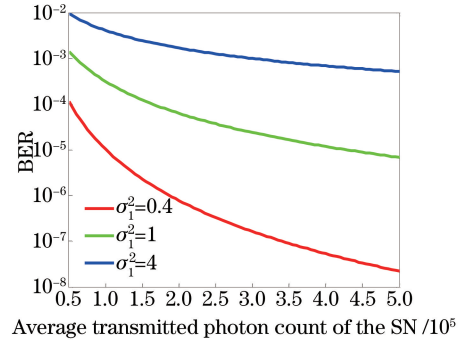


图 7 链路总长度为 4 km 时,在不同的湍流强度条件下,误码率与源节点发射的平均光子数的关系
Fig. 7 Relationship between BER and average transmitted photon count of the SN with different turbulence strengths when the length of the total link is 4 km

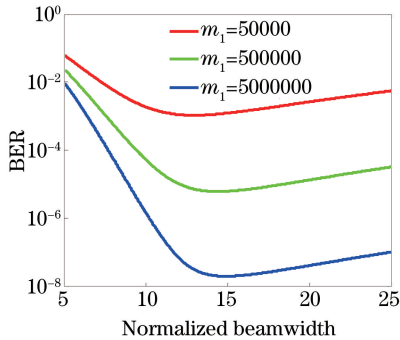


图 8 链路总长度为 4 km 时,在源节点发射的平均光子数不同的条件下,误码率与归一化束宽的关系
Fig. 8 Relationship between BER and normalized beamwidth with different average transmitted photon counts of the SN when the length of the total link is 4 km

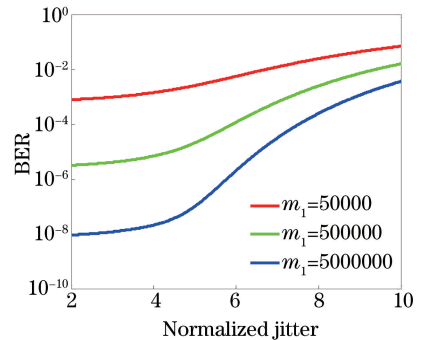


图 9 链路总长度为 4 km 时,在不同的源节点发射的平均光子数条件下,误码率与归一化抖动标准差的关系
Fig. 9 Relationship between BER and normalized jitter with different average transmitted photon counts of the SN when the length of the total link is 4 km

5 结 论

分析了一种全光双跳 FSO 系统的基本结构,研究了大气效应对自由空间光通信链路的影响,考虑了背景噪声和放大器自发辐射噪声对系统性能的影响,基于复合衰落信道模型推导了在全部信道状态信息时,系统中断概率和误码率的闭合表达式。通过仿真结果对比分析了使用全光放大转发中继的 FSO 与直传链路的中断概率,研究了信噪比、源节点发射平均光子数、光自由度等参数对系统性能的影响。结果表明,全光双跳放大转发中继能够明显改善系统性能,并且波束宽度的最优值使通信系统的性能达到最优,这对全光中继 FSO 系统的研究和设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, *et al.*. Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.
白 帅, 王建宇, 张 亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
- Wu Huiyun, Chen Jinbao, Sun Zhenhai. Analysis of beam propagation through a relay mirror system inturbulent

- atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0213001.
- 吴慧云, 陈金宝, 孙振海. 激光湍流大气中继传输性能分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0213001.
- 3 Ke Xizheng, Liu Mei. Diversity reception technology over atmospheric turbulence channels in wireless optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106005.
- 柯熙政, 刘 妹. 湍流信道无线光通信中的分集接收技术[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106005.
- 4 Kashani M A, Uysal M. Outage performance and diversity gain analysis of free-space optical multi-hop parallel relaying [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(8): 901-909.
- 5 Kashani M A, Safari M, Uysal M. Optimal relay placement and diversity analysis of relay-assisted free-space optical communication systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 37-47.
- 6 Abou-Rjeily C. Performance analysis of selective relaying in cooperative free-space optical systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(18): 2965-2973.
- 7 Peppas K P, Stassinakis A N, Nistazakis H E, *et al.*. Capacity analysis of dual amplify-and-forward relayed free-space optical communication systems over turbulence channels with pointing errors[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(9): 1032-1042.
- 8 Kazemlou S, Hranilovic S, Kumar S. All-optical multihop free-space optical communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(18): 2663-2669.
- 9 Bayaki E, Michalopoulos D S, Schober R. EDFA-based all-optical relaying in free-space optical systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(12): 3797-3807.
- 10 Yang L, Gao X, Alouini M S. Performance analysis of relay-assisted all-optical FSO networks over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4011-4018.
- 11 Trinh P V, Dang N T, Pham A T. Optical amplify-and-forward multihop WDM/FSO for all-optical access networks[C]. Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), 2014 9th International Symposium on, IEEE, 2014: 1106-1111.
- 12 Kashani M, Rad M M, Safari M, *et al.*. All-optical amplify-and-forward relaying system for atmospheric channels[J]. Communications Letters, IEEE, 2012, 16(10): 1684-1687.
- 13 Alnaboulsi M C, Fornel F D, Alnaboulsi M C. Fog attenuation prediction for optical and infrared waves [J]. Optical Engineering, 2004, 43(2): 319-329.
- 14 Han Liqiang, You Yahui. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005.
- 韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
- 15 Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system[C]. Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, ACM, 1990: 212-224.
- 16 Meijer G function. The wolfram function site[Z/OL]. [2015-11-02] <http://functions.wolfram.com>.
- 17 Li Jiongcheng, Lin Xibin, Xiao Henghui, *et al.*. Computer algorithm for high-degree Gauss-type quadrature [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 1871-1875.
- 李炯城, 林惜斌, 肖恒辉, 等. 高阶高斯型积分计算机求解算法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 1871-1875.
- 18 Zhao Y, Adve R, Lim T J. Symbol error rate of selection amplify-and-forward relay systems [J]. Communications Letters, IEEE, 2006, 10(11): 757-759.