

全光自由空间光通信中继协作方案的研究

韩立强 游雅晖

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种结合副载波强度调制直接探测技术和全光放大转发中继的自由空间光通信(FSO)系统的基本结构,考虑背景噪声和放大自发辐射噪声对系统性能的影响,建立了 Gamma-Gamma 湍流模型下的全光通信系统模型。提出了两种中继协作方案,即全活跃中继方案与选择中继方案,基于相应的方案给出功率分配方式,仿真对比了中继辅助传输链路和直传链路的链路中断概率,以及在不同信道参数及中继数下采用这两种方案的系统中断概率。结果表明,中继传输能够明显改善链路的性能,选择中继方案优于全活跃中继方案。

关键词 光通信;自由空间光通信;协作方案;中断概率;副载波强度调制;全光放大转发中继

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1006004

Cooperative Schemes in All-Optical Free-Space Optical Communication System

Han Liqiang You Yahui

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

Abstract A fundamental structure of all-optical free-space optical communication (FSO) system is presented. The system adopts subcarrier intensity modulation and all-optical amplify-and-forward relaying, and furthermore, it considers the effect of background noise and amplified spontaneous emission noise. A system model of the all-optical relaying FSO system under Gamma-Gamma turbulence condition is established. Two novel cooperative schemes, all-active relaying scheme and selective relaying scheme, are presented, and their corresponding power allocation modes are provided. The outage probability of the relay-assisted transmission is compared with that of the direct link, and the outage probability of the two schemes for different channel parameters and number of relays is analyzed by simulation. The simulation results show that the performance of the link can be improved obviously by the relayed transmission, and the performance of the selective relaying scheme is superior to that of the all-active relaying scheme.

Key words optical communications; free-space optical communication; cooperative schemes; outage probability; subcarrier intensity modulation; all-optical amplify-and-forward relaying

OCIS codes 060.1155; 010.1330; 060.2605

1 引言

自由空间光通信(FSO)又名空间光通信或者无线激光通信,是一种视距(LOS)传输技术,以可见光为信息载体,通过大气传输数据、图像、语言等信息^[1]。该技术是微波通信与光纤通信技术相结合的产物,具备微波通信的灵活接入和光纤通信的高传输速率等优点,近年来成为通信领域的研究热点。但是 FSO 链路在大气中传输时容易受到雨、雾、雪天气和大气湍流的影响^[2],导致系统传输性能下降。

分集接收技术通过多个分支接收同一信息,能有效地减小大气湍流对光通信系统的影响,从而改善系统的接收性能。多入多出(MIMO)分集技术可以有效地减小信道衰落深度并缩短衰落时间^[3],得到广泛的研究和应用。基于不同的调制方法,文献[4]研究了 Gamma-Gamma 信道下采用差分相移键控(DPSK)的 MIMO FSO 系统及单发多收(SIMO)的 FSO 系统的中断概率和误码率性能;文献[5]研究了 Gamma-

收稿日期: 2016-06-13; 收到修改稿日期: 2016-08-03

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: ysdxhqlq@163.com

Gamma 信道下采用开关键控(OOK)的 FSO 系统分集接收技术的三种合并算法的误码率性能;文献[6]研究了对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布的湍流信道下采用直接强度探测(IM/DD)的 MIMO FSO 系统的遍历容量。

中继辅助传输技术也是一种有效的自由空间光通信链路衰落补偿方法^[7],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的优势。对于采用中继的通信系统,学者们提出了各种协作策略,如放大转发模式^[8]、译码转发模式^[9]、编码转发模式^[10],其中放大转发模式对硬件设备的要求低,所以被广泛应用于协作通信系统。

上述中继器都需要光-电-光转换过程,中继设备十分复杂。受全光传输型中继器应用于光纤通信的启发,2011年,Kazemlou 等^[11]首次提出将全光中继技术应用于 FSO 系统,之后有学者对全光 FSO 系统进行了较为深入的研究^[12-14],但是对全光 FSO 系统的多中继协作方案研究较少。

本文研究了 Gamma-Gamma 湍流模型下,采用全光放大转发中继的协作 FSO 系统的中断概率,将 MIMO 技术与中继辅助传输相结合,提出了系统的结构图、两种协作方案及相应的功率分配方式,理论推导并仿真对比了这两种协作方案的系统的中断概率。

2 系统和信道模型

2.1 系统模型

多中继协作 FSO 系统如图 1 所示,系统由一个源节点(SN)、一个目的节点(DN)和 K 个并行中继节点(RN)组成,其中 h_0 代表直传链路的信道衰落, $h_{i,j}$ 代表第 i 条支路中第 j 跳的信道衰落。

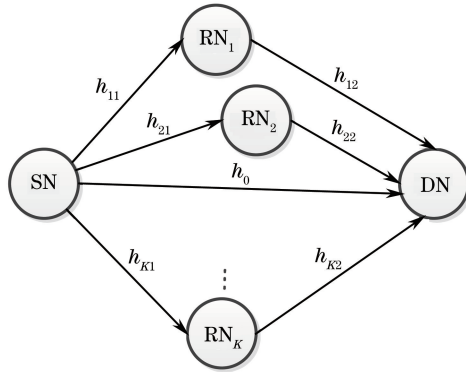


图 1 多中继协作 FSO 系统

Fig. 1 Multi-relay cooperative FSO system

提出的协作 FSO 通信系统的结构如图 2 所示,各节点采用副载波强度调制直接探测技术,将掺铒光纤放大器(EDFA)作为光学放大器放置在中继节点,考虑各节点的背景噪声及放大自发辐射噪声。其基本原理为:目的节点的接收端对各支路的信道进行估计,并将估计结果反馈到源节点的发射端,发射端基于反馈的信道信息及采用的协作方案调整各发射孔径的功率分配来匹配当前的信道状况。

系统的传输包括两个时间段:第一个时间段,源节点发送信号,中继节点和目的节点都能收到信号;第二个时间段,基于信道状态信息,中继节点对接收到的信号进行放大并转发给目的节点。

为很好地分析系统的模型,做以下假设和说明:1) 源节点的平均发射功率及系统总的平均发射功率恒定,源节点各发射孔径的发射功率相等,采用光子计数法,假设源节点发射的总光子数为 m_0 ,源节点每一个发射孔径发射的信号为 y_s ,平均光子数为 m_1 ;2) 各节点的背景噪声相等,采用负二项分布建模,平均光子数为 m_R ;3)

中继节点可以获得全部信道状态信息,各中继节点中光学放大器的放大增益为 $G_i = \frac{m_1}{h_{i1}m_1 + m_R}, i = 1, \dots, K$;4) 放大器的自发辐射噪声为 n_{Ai} ,其光子数为 $m_{ASE} = n_{sp}(G_i - 1)$,其中 n_{sp} 为放大自发辐射系数。

为便于理解,下面从直传链路和中继辅助传输链路两个角度来分析系统目的节点各接收孔径接收到的信号。

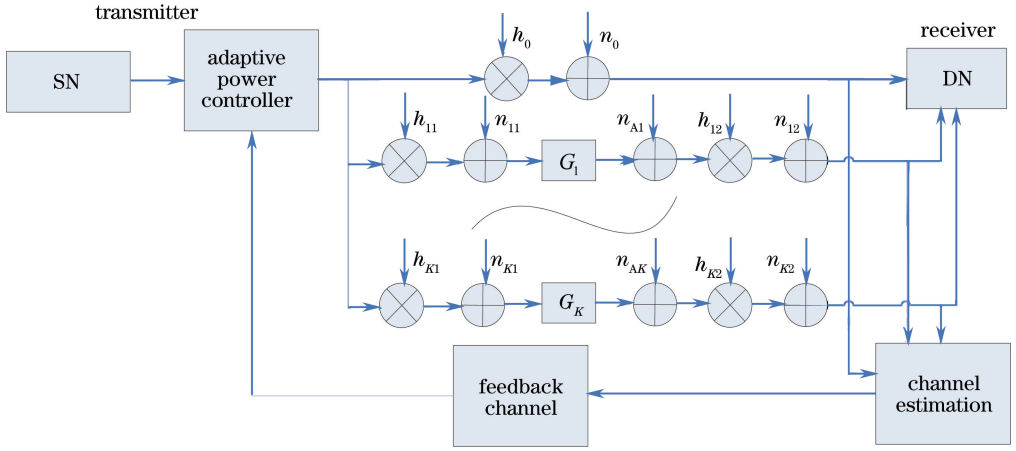


图 2 全光并行中继协作 FSO 系统结构

Fig. 2 Structure of cooperative FSO system with parallel all-optical relays

2.1.1 直传链路

直传链路(Direct link)指源节点到目的节点的直接传输,则目的节点接收到的信号为

$$y_{D0} = h_0 y_S + n_0, \quad (1)$$

式中 h_0 为直传链路源节点与目的节点的信道衰落, n_0 为目的节点的背景噪声。

2.1.2 全光中继传输链路

全光中继传输链路(OAF)是指源节点发射信号至中继节点,中继节点对信号进行放大并转发至目的节点的链路。第 i 个中继节点接收到的信号为

$$y_{Ri} = h_{i1} y_S + n_{i1}, \quad (2)$$

式中 h_{i1} 为第 i 条中继辅助传输链路中源节点到中继节点的信道衰落, n_{i1} 为中继节点的背景噪声。

第 i 条支路目的节点接收到的信号为

$$y_{Di} = h_{i2} (y_{Ri} G_i + n_{Ai}) + n_{i2}, \quad (3)$$

式中 h_{i2} 为第 i 条中继辅助传输链路中中继节点到目的节点的信道衰落, n_{i2} 为目的节点的背景噪声。

将(2)式代入(3)式得

$$y_{Di} = h_{i2} h_{i1} y_S G_i + h_{i2} n_{i1} G_i + h_{i2} n_{Ai} + n_{i2}. \quad (4)$$

2.2 信道模型

Gamma-Gamma 函数可以用来描述各种强度的湍流,因此选择 Gamma-Gamma 湍流模型,建立包含大气损耗 h_a 、大气湍流 h_s 和瞄准误差 h_p 的复合信道模型,则每一级跳的信道衰落为

$$h = h_a h_s h_p, \quad (5)$$

其概率密度函数为^[15]

$$f_h(h) = \frac{\alpha \beta \xi^2}{A h_a \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha \beta}{A h_a} h \left| \begin{matrix} \xi^2 \\ \xi^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right. \right), \quad (6)$$

式中 $\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49 \sigma_1^2}{(1 + 1.11 \sigma_1^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$, $\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51 \sigma_1^2}{(1 + 0.69 \sigma_1^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}$, σ_1^2 为 Rytov 方差, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $h_a = \exp(-10 \sigma_0^{10} z)$, σ_0 为大气衰落系数, z 为链路的传输距离, A 为在径向距离为 0 时的部分收集功率; ξ 为在接收端处等效光束半径和瞄准误差抖动标准偏移量之间的比值, $G(\cdot)$ 为 Meijer G 函数。

3 单输入单输出系统中断概率分析

当链路的容量不能满足用户要求的传输速率时,就会产生中断事件。链路的容量随信噪比单调递增,若给定信噪比阈值 γ_{th} ,当链路的信噪比低于该阈值时,链路发生中断,即每一条链路的中断概率可以记为

$$P_i = P_r(\gamma_i \leq \gamma_{th}), \quad (7)$$

式中 γ_i 为第 i 条全光中继传输链路的信噪比。

3.1 直传链路

直传链路的信噪比为

$$\gamma_0 = m_1 h_0. \quad (8)$$

根据(6)式可得 γ_0 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_0}(\gamma_0) = \frac{\alpha_0 \beta_0 \xi_0^2}{m_1 A_0 h_{0,a} \Gamma(\alpha_0) \Gamma(\beta_0)} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha_0 \beta_0}{m_1 A_0 h_{0,a}} \gamma_0 \left| \begin{matrix} \xi_0^2 \\ \xi_0^2 - 1, \alpha_0 - 1, \beta_0 - 1 \end{matrix} \right. \right), \quad (9)$$

则直传链路的的中断概率为

$$P_o = P_r(\gamma_0 \leq \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_0}(\gamma_0) d\gamma_0. \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式,根据文献[16]及 $z^k G_{p,q}^{m,n} \left(z \left| \begin{matrix} a_p \\ b_q \end{matrix} \right. \right) = G_{p,q}^{m,n} \left(z \left| \begin{matrix} a_p + k \\ b_q + k \end{matrix} \right. \right)$, 可得

$$P_o = \frac{\xi_0^2}{\Gamma(\alpha_0) \Gamma(\beta_0)} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha_0 \beta_0 \gamma_{th}}{m_1 A_0 h_{0,a}} \left| \begin{matrix} 1, \xi_0^2 + 1 \\ \xi_0^2, \alpha_0, \beta_0, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (11)$$

3.2 全光中继传输链路

由(4)式可知,第 i 条全光中继传输链路的信噪比为

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_i + M_i b_i (1 + b_i) + 2a_i b_i}, \quad (12)$$

式中 $a_i = G_i h_{i1} h_{i2} m_1, b_i = m_R + G_i h_{i2} m_R + h_{i2} m_{ASE}, M_i$ 为光学自由度。

将 $G_i = \frac{m_i}{h_{i1} m_1 + m_R}$ 代入(12)式,可得

$$\gamma_i = (2\gamma_{i1}^{-1} + M_i \gamma_{i1}^{-2} + \gamma_{i2}^{-1})^{-1}, \quad (13)$$

式中 γ_{i1} 为源节点到中继节点的平均信噪比, $\gamma_{i1} = m_1 h_{i1}; \gamma_{i2}$ 为中继节点到目的节点的平均信噪比, $\gamma_{i2} = m_2 h_{i2}$ 。

由(6)式得 γ_{i1} 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_{i1}}(\gamma_{i1}) = \frac{\alpha_{i1} \beta_{i1} \xi_{i1}^2}{m_1 A_{i1} h_{i1,a} \Gamma(\alpha_{i1}) \Gamma(\beta_{i1})} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha_{i1} \beta_{i1}}{m_1 A_{i1} h_{i1,a}} \gamma_{i1} \left| \begin{matrix} \xi_{i1}^2 \\ \xi_{i1}^2 - 1, \alpha_{i1} - 1, \beta_{i1} - 1 \end{matrix} \right. \right), \quad (14)$$

同理, γ_{i2} 的概率密度函数为

$$f_{\gamma_{i2}}(\gamma_{i2}) = \frac{\alpha_{i2} \beta_{i2} \xi_{i2}^2}{m_2 A_{i2} h_{i2,a} \Gamma(\alpha_{i2}) \Gamma(\beta_{i2})} \times G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha_{i2} \beta_{i2}}{m_2 A_{i2} h_{i2,a}} \gamma_{i2} \left| \begin{matrix} \xi_{i2}^2 \\ \xi_{i2}^2 - 1, \alpha_{i2} - 1, \beta_{i2} - 1 \end{matrix} \right. \right). \quad (15)$$

给定信噪比阈值 γ_{th} , 则全光中继传输链路的的中断概率为

$$P_{out} = P_r(\gamma_i \leq \gamma_{th}) = \int_0^{\infty} P_r(\gamma_i \leq \gamma_{th} | \gamma_{i1}) f_{\gamma_{i1}}(\gamma_{i1}) d\gamma_{i1}. \quad (16)$$

根据条件概率公式,由(14)、(15)式可得第 i 条全光中继链路的中断概率为^[17]

$$P_i = \rho_{i1} G_{2,4}^{3,1} \left(\frac{\alpha_{i1} \beta_{i1} \gamma_i^*}{m_1 A_{i1} h_{i1,a}} \left| \begin{matrix} 1, \xi_{i1}^2 + 1 \\ \xi_{i1}^2, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, 0 \end{matrix} \right. \right) + \frac{\rho_{i1} \rho_{i2} \alpha_{i1} \beta_{i1} \exp(-\gamma_i^*)}{2m_1 A_{i1} h_{i1,a}} \sum_{t=1}^{N_p} \omega_t \times G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha_{i2} \beta_{i2} \varphi_i(-\ln x_t)}{m_2 A_{i2} h_{i2,a}} \left| \begin{matrix} 1, \xi_{i2}^2 + 1 \\ \xi_{i2}^2, \alpha_{i2}, \beta_{i2}, 0 \end{matrix} \right. \right] \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha_{i1} \beta_{i1} (-\ln x_t)}{m_1 A_{i1} h_{i1,a}} \left| \begin{matrix} \xi_{i1}^2 \\ \xi_{i1}^2 - 1, \alpha_{i1} - 1, \beta_{i1} - 1 \end{matrix} \right. \right] \frac{1}{x_t}, \quad (17)$$

式中 $\gamma_i^* = \frac{M_i}{\sqrt{1 + M_i \gamma_{th}^{-1}} - 1}, \rho_{ij} = \frac{\xi_{ij}^2}{\Gamma(\alpha_{ij}) \Gamma(\beta_{ij})}, i \in \{1, \dots, K\}, j \in \{1, 2\}, \varphi_i(\gamma_{i1}) = (\gamma_{th}^{-1} - 2\gamma_{i1}^{-1} - M_i \gamma_{i1}^{-2})^{-1}, \omega_t$ 为 N_p 阶高斯公式的权重, x_t 为 N_p 阶高斯公式的节点。

4 中继协作方案及系统中断概率分析

目的节点接收到的信号为各接收孔径接收到的支路信号的加权之和,即

$$y_D = \sum_{i=0}^K \omega_i y_{Di}, \quad (18)$$

式中 ω_i 为第 i 条支路的加权系数。

对不同的中继协作方案,加权系数不同,下面详细介绍全活跃中继方案(A11)及选择中继方案(SC)。

4.1 全活跃中继方案

全活跃中继方案是指所有的支路都参与信号的传输,包括直传链路和 K 条全光中继传输链路,最后来自各支路的信号在目的节点的接收器中进行同相加权合并。假设源节点各发射孔径的发射功率相等,即

$$m_1 = \frac{m_0}{K+1}, \text{ 则系统总信噪比为}$$

$$\gamma_{\text{All}} = \sum_{i=0}^K \gamma_i. \quad (19)$$

所有的支路都中断时系统才发生中断事件。如果给定信噪比阈值 γ_{th} ,则采用全活跃中继方案的 FSO 系统的中断概率为

$$P_{\text{All}} = \prod_{i=0}^K P_i. \quad (20)$$

4.2 选择中继方案

选择中继方案对系统的硬件设备要求较为复杂,首先目的节点需要估计各支路的信道状态,判断直传链路的性能是否良好,其评价标准是信噪比是否大于某个值,若大于这个值,则直接选择直传链路;若小于这个值,则选择全光中继链路中信噪比最大的支路。无论选择哪一条支路,源节点发射到该支路的平均光子数都为 m_0 。假设这个值取为 γ_{th}^1 ,则

1) 当 $\gamma_0 \geq \gamma_{\text{th}}^1$ 时,目的节点最终接收到的信号为 $y_{\text{DSC}} = y_{D0}$,系统的信噪比为 $\gamma_{\text{SC}} = \gamma_0$,系统的中断概率为

$$P_{\text{SC}} = P_r(\gamma_{\text{th}}^1 \leq \gamma_0 \leq \gamma_{\text{th}}) = P_0(\gamma_{\text{th}}) - P_0(\gamma_{\text{th}}^1). \quad (21)$$

2) 当 $\gamma_0 < \gamma_{\text{th}}^1$ 时,目的节点最终接收到的信号为 $y_{\text{DSC}} = \max_{i=1, \dots, K} y_{Di}$,系统的信噪比为 $\gamma_{\text{SC}} = \operatorname{argmax}_{i \in \{1, \dots, K\}} \gamma_i$,系统的中断概率为

$$P_{\text{SC}} = P_r(\gamma_0 < \gamma_{\text{th}}^1) \cdot \prod_{i=1}^K P_r(\gamma_i \leq \gamma_{\text{th}}) = P_0(\gamma_{\text{th}}^1) \prod_{i=1}^K P_i(\gamma_{\text{th}}). \quad (22)$$

5 仿真结果

系统参数取值如表 1 所示。假设全光中继链路每一级跳的传输距离相等,且取 $\gamma_{\text{th}}^1 = \gamma_{\text{th}}$ 。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Atmospheric attenuation coefficient σ_0 /(dB/km)	0.43
Rytov variance σ_1^2 under weak turbulence	0.4
Rytov variance σ_1^2 under medium turbulence	1
Rytov variance σ_1^2 under strong turbulence	4
Normalized beam width $\omega_{z,1}/r_1$	16
Normalized jitter σ_s/r_1	4
Optical degree of freedom M	100
Normalized threshold γ_{th} /dB	0
Order of the Gaussian formula N_p	21

图 3 为全光中继链路和直传链路在弱、中、强湍流条件下的中断概率,其中每条链路的平均光子数为 5×10^5 。由图可以看出,中断概率随着链路总传输距离和湍流强度的增大而增大;当链路的传输距离较小时,采用全光放大转发中继不能改善链路的可靠性,当传输距离较大时,采用全光放大转发中继可以明显改

善链路的性能。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的小,当传输距离大于 4.3 km 时,采用全光中继链路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自发辐射噪声,当传输距离较小时,这些噪声对链路性能的影响较大,当传输距离较大时,这些噪声对性能的削减效应被中继的协作分集增益抵消。

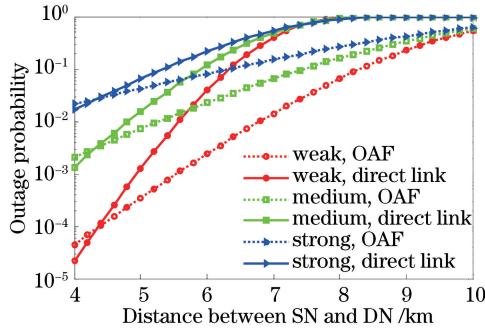


图 3 不同湍流强度下全光中继链路和直传链路的中断概率

Fig. 3 Outage probability of all-optical relayed link and direct link under different turbulences

图 4 为并行中继数 K 分别为 1、2、3,源节点发射的点光子数 $m_0 = 5 \times 10^5$ 时,在中度湍流下采用提出的两种协作方案的 FSO 系统的中断概率。从图中可以看出,系统的中断概率随着传输距离的增加或者中继数目的减小而增大;当传输距离和中继数一定时,对比两种协作方案的系统中断概率可以看出,选择中继方案明显优于全活跃中继方案,例如当 $K=3$,传输距离为 6 km 时,采用选择中继方案和全活跃中继方案的 FSO 系统中断概率分别为 8.2×10^{-7} 和 8.5×10^{-3} 。

图 5 为并行中继数 K 分别为 1、2、3,传输距离为 6 km 时,在中度湍流下采用提出的两种中继协作方案的 FSO 系统的中断概率。由图可以看出,系统的中断概率随着源节点发射的平均光子数和并行中继数目的增加而减小;当源节点发射的平均光子数和中继数一定时,对比采用这两种方案的系统中断概率可以看出,选择中继方案明显优于全活跃中继方案,例如当 $K=2$,源节点发射的平均光子数为 3×10^6 时,采用选择中继方案的中断概率为 6.2×10^{-10} ,采用全活跃中继方案的中断概率为 9.6×10^{-7} ,并且随着源节点发射的平均光子数的增加,选择中继方案的优势更加明显。

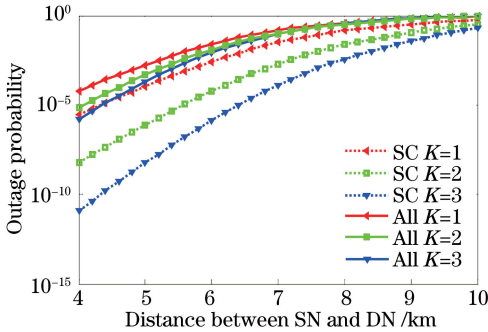


图 4 中度湍流下, $m_0 = 5 \times 10^5$ 时两种协作方案的中断概率与传输距离的关系

Fig. 4 Outage probability of the two cooperative schemes versus transmission distance with $m_0 = 5 \times 10^5$ under medium turbulence

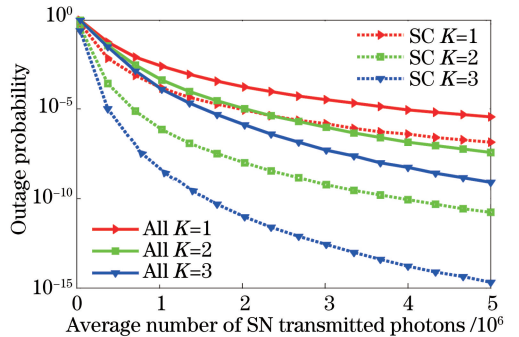


图 5 中度湍流下,总的链路距离为 6 km 时两种协作方案的中断概率与源节点发射平均光子数的关系

Fig. 5 Outage probability of the two cooperative schemes versus the average number of SN transmitted photons when the transmission distance is 6 km under medium turbulence

6 结 论

基于全光协作 FSO 系统的结构图,提出了两种多中继协作方案,既考虑了源节点与目的节点的直接传输,也考虑了中继辅助传输;通过 Gamma-Gamma 湍流下的复合信道模型,理论推导并仿真分析了采用这两

种方案的 FSO 系统的中断概率。结果表明,当传输距离较大时,全光中继辅助传输链路可以很好地削减大气效应对通信质量的影响;随着中继数的增加,系统的性能越来越好;在相同的信道参数下,选择中继方案的系统性能更好。

参 考 文 献

- 1 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo, *et al.* Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906004.
胡庆松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906004.
- 2 Shou Qin, Zhang Tao, Wang Han. Analysis of BER performance in free-space optical MIMO-OFDM communication systems over the Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020602.
寿 钦, 张 涛, 王 涵. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信 MIMO-OFDM 系统误比特率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020602.
- 3 Zhou Zhongmou, Chen Zhikai. Experimental study of MIMO wireless optical communication diversity reception system [J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(23): 145-148.
周仲谋, 陈智凯. MIMO 无线光通信分集接收系统的实验研究[J]. *电子设计工程*, 2015, 23(23): 145-148.
- 4 Zhang Huiying, Li Hongzuo, Xiao Dongya, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(4): 0405002.
张慧颖, 李洪祚, 肖冬亚, 等. 大气湍流综合效应下空间分集接收性能研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0405002.
- 5 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.
- 6 Boludaruiz R, Garciazambrana A, Castillovázquez B, *et al.* Impact of nonzero boresight pointing error on ergodic capacity of MIMO FSO communication systems[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3513-3534.
- 7 Safari M, Uysal M. Relay-assisted free-space optical communication [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5441-5449.
- 8 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.
- 9 Abou C. Achievable diversity orders of decode-and-forward cooperative protocols over Gamma-Gamma fading FSO links [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(9): 3919-3930.
- 10 Chu Hongfa, Niu Kai, He Zhiqiang, *et al.* A new optimal transfer matrix algorithm designed for MIMO AF relay system with precoding[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(S1): 41-45.
褚红发, 牛 凯, 贺志强, 等. 放大重传协议下优化的 MIMO 中继预编码转发矩阵设计算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(S1): 41-45.
- 11 Kazemlou S, Hranilovic S, Kumar S. All-optical multihop free-space optical communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(18): 2663-2669.
- 12 Kashani M, Rad M M, Safari M, *et al.* All-optical amplify-and-forward relaying system for atmospheric channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(10): 1684-1687.
- 13 Wang J Y, Wang J B, Chen M, *et al.* Performance analysis for free-space optical communications using parallel all-optical relays over composite channels[J]. *IET Communications*, 2014, 8(9): 1437-1446.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 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*, 1990: 212-224.
- 17 Han Liqiang, You Yahui. Performance analysis of all-optical dual-hop free-space optical communication systems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050101.
韩立强, 游雅晖. 全光双跳自由空间光通信系统的性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050101.