

文章编号 1004-924X(2022)05-0536-09

混合毫米波射频/多输入多输出-自由空间 光通信中继系统

刘 维¹, 王静怡¹, 马鑫洋¹, 石文孝^{1*}, 曹景太^{1,2}

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130012)

摘要: 为准确评价混合毫米波射频/多输入多输出-自由空间光通信(millimeter Wave Radio Frequency/Multiple Input Multiple Output-Free Space Optical, mmW RF/MIMO-FSO)中继系统的性能, 利用 Meijer-G 函数推导出混合 mmW RF/MIMO-FSO 中继系统端到端中断概率、误码率以及遍历容量的闭合解析表达式。该混合系统的中继采用固定增益方案、接收端采用等增益合并方式合并多路信号。mmW RF 信道服从 Nakagami- m 衰落, FSO 信道服从 Gamma-Gamma 分布。数值仿真结果显示, MIMO 技术可以有效缓解由于大气湍流强度的增强而导致的混合中继系统性能降低。随着激光发射器和光电探测器相对应的收发孔径数目的增加, 混合中继系统性能逐渐增强, 但与此同时系统的复杂度也不断提高。综合分析可知, 当激光发射器发送的激光信号束与光电探测器使用的接收孔径数相等且都为 2 时, MIMO-FSO 链路的性能达到最佳状态。

关键词: 空间光通信; 混合射频/自由光通信中继系统; 毫米波; 多输入多输出; 固定增益

中图分类号: TN929.13 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223005.0536

Hybrid millimeter wave RF/MIMO-FSO relay system

LIU Wei¹, WANG Jingyi¹, MA Xinyang¹, SHI Wenxiao^{1*}, CAO Jingtai^{1,2}

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: swx@jlu.edu.cn

Abstract: To accurately evaluate the performance of the hybrid millimeter wave radio frequency (RF) and multiple input multiple output (MIMO) free space optical (FSO) relay system, the Meijer G function is used to derive the end-to-end interruption probability, bit error rate and traversal of the hybrid mmW RF/MIMO FSO relay system. Further, the proposed approach employs the closed analytical expression of the capacity. The relay of the hybrid system adopts a fixed gain scheme, and the receiving end adopts an equal gain aggregation scheme to combine multiple equivalent signals. The mmW RF channel obeys Nakagami- m fading, whereas the FSO channel obeys the Gamma-Gamma distribution. The results of numerical simulation show that the MIMO technology can effectively alleviate the performance degradation of the hybrid relay system caused by the intensification of atmospheric turbulence. The performance of the hybrid relay

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-08-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62001448)

system is gradually enhanced by increasing the number of transceiver apertures. However, this also increases the complexity of the system. Comprehensive analysis shows that the MIMO-FSO link performs best when the number of apertures receiving the laser signal from the transmitter is equal to the number of receiving apertures on the photo detector (i. e. two apertures).

Key words: space optical communication; hybrid radio frequency /free space optical relay system; millimeter wave; multiple input multiple output; fixed gain

1 引 言

自由空间光通信(Free-Space Optical Communication, FSO)是一种以激光和大气分别作为信息载体和传输媒介的新兴无线通信方式^[1],具有无需频率许可、带宽巨大、速率高、保密性高、成本低廉等优点,已被越来越多地应用在无线通信场景中。然而,大气湍流等随机因素会严重影响FSO的系统性能,缩短FSO系统的传输距离。

将射频(Radio Frequency, RF)链路 with FSO链路进行组合构成混合通信系统,它可以有效提高网络的稳定性,如混合RF/FSO中继系统、RF/FSO混合备份系统等^[2]。其中,混合RF/FSO中继系统通过中继节点将信息从RF链路转发到FSO链路,能够延长传输距离。本文在混合RF/FSO中继系统的基础上,在RF链路中对毫米波展开研究,在FSO链路中应用了多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术,构成了混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统。

毫米波RF链路和FSO链路都受衰落影响,其中毫米波RF链路的衰落主要由多径传播引起,常见的描述毫米波RF链路衰落的模型有Rician分布^[3]和Nakagami- m 分布^[4]。对于FSO链路,大气湍流和指向性误差是产生衰落的主要原因,常见的描述FSO链路衰落的模型有:Log-normal分布^[5]、Gamma-Gamma分布^[6]和M分布^[7]等。Shakir等首次分析了基于固定增益的混合毫米波RF/FSO系统的中断性能^[8],其中RF链路和FSO链路分别建模为Rician分布和Gamma-Gamma分布。Trinh等推导了RF链路和FSO链路分别服从Rician分布和M分布的混合毫米波RF/FSO中继系统的性能表达式^[9],并用仿真进行数学分析。目前,混合毫米波RF/FSO

中继系统的研究大多集中在毫米波RF信道服从Rician分布、FSO链路采用单输入单输出技术上。本文研究当毫米波RF链路的衰落服从Nakagami- m 分布、FSO链路运用MIMO技术且中继采用固定增益方案时混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统的性能,推导了中断概率(Outage Probability, OP)、平均误码率(Average Bit Error Rate, ABER)和遍历容量的闭合形式表达式,并经过仿真验证了结果的正确性

2 系统模型

混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统如图1所示。发送端S和中继R之间为毫米波RF链路,S-R链路为该系统的第一跳链路,假设该链路服从Nakagami- m 衰落。中继R和接收端D之间为MIMO-FSO链路,R-D链路为该系统的第二跳链路,假设该链路在大气湍流的作用下服从Gamma-Gamma分布。S-R链路 with R-D链路的工作频段完全不同,所以二者之间不存在干扰。中继R处采用固定增益方案将接收到的电信号转换为光信号,再由多个孔径发射至FSO链路。接收端D处采用等增益合并(Equal Gain Combining, EGC)方式,合并由多个孔径接收到的激光信号。



图1 混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统

Fig. 1 Hybrid mmW RF/MIMO-FSO relay system

中继R采用固定增益方案,以固定的量化系数放大接收到的信号,随后转发到接收端D。通常量化系数在发送端S发出信号时就已确定,不会随着S-R链路的信道状态信息的改变而改变。基于固定增益的中继系统端到端的瞬时SNR为^[10]:

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}} + C}, \quad (1)$$

其中: γ_{SR} 和 γ_{RD} 分别为S-R链路和R-D链路的瞬时SNR; C 为常数,通常取1。

3 信道衰落模型

3.1 毫米波RF信道衰落模型

S-R链路服从Nakagami- m 衰落,它的PDF和CDF表达式分别为^[4]:

$$f_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{SR}}) = \left(\frac{m}{\gamma_{\text{SR}}} \right)^m \frac{\gamma_{\text{SR}}^{(m-1)}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m\gamma_{\text{SR}}}{\gamma_{\text{SR}}}\right), \gamma_{\text{SR}} \geq 0, \quad (2)$$

$$F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{SR}}) = 1 - \frac{1}{\Gamma(m)} \Gamma\left(m, \frac{m\gamma_{\text{SR}}}{\gamma_{\text{SR}}}\right), \quad (3)$$

其中: $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数; m 为Nakagami- m 分布的衰落系数($m \geq 0.5$),通过改变该参数,该分布可以模拟从强度到中度、轻度或者无衰落的信道衰落情况。Nakagami- m 分布不仅涵盖了Rayleigh分布和Rician分布等信号衰落的特殊情况,对实际数据的拟合情况也优于其他分布。

3.2 FSO信道衰落模型

R-D链路服从Gamma-Gamma分布,其接收端光强的归一化瞬时辐照度为 $I = I_X I_Y$ 。其中, I_X 表示大尺度湍流引起的折射效应, I_Y 表示小尺度湍流引起的散射效应, I_X 和 I_Y 相互独立且均服从Gamma分布。它们的PDF表达式分别为^[6]:

$$f_{I_X}(I_X) = \frac{\alpha(\alpha I_X)^{\alpha-1} \exp(-\alpha I_X)}{\Gamma(\alpha)}, I_X > 0, \alpha > 0, \quad (4)$$

$$f_{I_Y}(I_Y) = \frac{\beta(\beta I_Y)^{\beta-1} \exp(-\beta I_Y)}{\Gamma(\beta)}, I_Y > 0, \beta > 0. \quad (5)$$

利用变量代换计算出 I 的PDF表达式为:

$$f_I(I) = \int_0^\infty f_{I_X}(I I_X) f_{I_Y}(I_X) dI_X = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}} I^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} K_{\alpha-\beta}[2(\alpha\beta I)^{1/2}], \quad (6)$$

其中: $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是 $\alpha-\beta$ 阶的第二类修正贝塞尔函数, α 和 β 分别表示大尺度湍流和小尺度湍流系数,取决于Rytov方差,即有:

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

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_I^2}{(1+0.69\sigma_I^{12/5})^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (8)$$

将MIMO技术引入FSO系统提高信道分集增益,从而降低信道衰落对信号传输过程的影响。激光发射器发送 M 束激光信号,光电探测器使用 N 个孔径进行接收,之后利用分集合并技术合并信号。

当接收端光电探测器各个孔径间距离大于激光信号的相干距离时,接收信号不相关,此时第 p 个孔径接收到的信号可表示为:

$$y_p = \sum_{q=1}^M \eta x_q + n_p, \quad (9)$$

其中: η 为光电转换系数, n_p 为加性高斯白噪声。之后采用EGC方式合并信号,即各路信号的加权因子相同,那么经过线性组合器的信号可表示为:

$$z = \sum_{p=1}^N \omega y_p = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^M \omega \eta x_q + n. \quad (10)$$

由此可知,在大气湍流效应的影响下,采用EGC方式的MIMO-FSO系统中,多个独立且均服从Gamma-Gamma分布的随机变量的和的PDF表达式为^[11]:

$$f_h(h) = \frac{2\left(\frac{\alpha_s \beta_s}{MN}\right)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}} h^{\frac{\alpha_s + \beta_s}{2}-1} \times K_{\alpha_s - \beta_s}\left[2\sqrt{\frac{\alpha_s \beta_s h}{MN}}\right]}{\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s)}, h > 0, \quad (11)$$

其中: α_s 和 β_s 是新的湍流系数, $\alpha_s = MN\alpha$, $\beta_s = MN\beta$ 。

为了方便计算,根据文献[12]重写式(11)中的贝塞尔函数,可以得出^[13]:

$$f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) = \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}} \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4} - 1}}{2\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s) \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\alpha_s \beta_s \sqrt{\frac{\gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, -\frac{\alpha_s - \beta_s}{2} \right. \right], \quad (12)$$

其中 $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 为 Meijer G 函数。式(12)对应的

CDF 函数为^[14]:

$$F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) = \frac{2^{\alpha_s + \beta_s - 2}}{\pi\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s)} \times G_{1,5}^{4,1} \left[\frac{A\gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}}} \left| \frac{\alpha_s}{2}, \frac{\alpha_s + 1}{2}, \frac{\beta_s}{2}, \frac{\beta_s + 1}{2}, 0 \right. \right], \quad (13)$$

其中 $A = \frac{(\alpha_s \beta_s)^2}{16}$ 。

述为:

$$P_{\text{out}} = \Pr\{\gamma < \gamma_{\text{th}}\} = F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}). \quad (14)$$

4 性能分析

将式(1)代入式(14)并化简得到:

$$F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}) = \int_0^{\infty} F_{\gamma_{\text{SR}}} \left(\frac{\gamma(\gamma_{\text{RD}} + 1)}{\gamma_{\text{RD}}} \right) f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}. \quad (15)$$

4.1 中断概率

当端到端瞬时 SNR 低于阈值门限时,系统发生中断而无法通信。通信系统的 OP 通常表

将式(3)及式(12)代入式(15),得到:

$$F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}}}{2\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s)\Gamma(m) \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times \int_0^{\infty} \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4} - 1} \Gamma \left(m, \frac{m(1 + \gamma_{\text{RD}})\gamma}{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}} \right) \times G_{0,2}^{2,0} \left[\alpha_s \beta_s \sqrt{\frac{\gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right] d\gamma_{\text{RD}}. \quad (16)$$

将上届不完全 Gamma 函数改写成累和形式,代入式(16)化简得到:

$$F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}}}{2\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s) \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times \exp \left(-\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{SR}}} \right) \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^a \binom{a}{b} \frac{1}{a!} \left(\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{SR}}} \right)^a \times \int_0^{\infty} \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4} - b - 1} \exp \left(-\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}} \right) \times G_{0,2}^{2,0} \left[\alpha_s \beta_s \sqrt{\frac{\gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}}}} \left| \frac{\alpha_s - \beta_s}{2}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{2} \right. \right] d\gamma_{\text{RD}}. \quad (17)$$

根据文献[15]计算式(17)可得:

$$F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}}}{4\pi\Gamma(\alpha_s)\Gamma(\beta_s) \gamma_{\text{RD}}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \exp \left(-\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{SR}}} \right) \times \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^a \binom{a}{b} \frac{1}{a!} \left(\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{SR}}} \right)^{a-b+\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}} \times G_{0,5}^{5,0} \left[\frac{Am\gamma}{\gamma_{\text{SR}}} \left| -\kappa_1 \right. \right], \quad (18)$$

其中: $\kappa_1 = \frac{\alpha_s - \beta_s}{4}, \frac{\alpha_s - \beta_s + 2}{4}, \frac{\beta_s - \alpha_s}{4}, \frac{\beta_s - \alpha_s + 2}{4}, b - \frac{\alpha_s + \beta_s}{4}$ 。

4.2 平均误码率

ABER是指数据传输过程中错误码元数占总码元数的百分比,也是用于分析通信系统性能的一个重要指标^[16]。其计算公式为:

$$\bar{P}_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \exp(-q\gamma) \gamma^{p-1} F_\gamma(\gamma) d\gamma, \quad (19)$$

其中: p 和 q 取不同的值表示不同的二进制调制方案,具体见表1。

表1 不同二进制调制方案的ABER参数

Tab.1 ABER parameters of different binary modulation schemes

调制方案	p	q
相干二进制频移键控(CBFSK)	0.5	0.5
相干二进制相移键控(CBPSK)	0.5	1
非相干二进制频移键控(NBFSK)	1	0.5
差分二进制相移键控(DBPSK)	1	1

将式(18)代入式(19)可以得到:

$$\bar{P}_b = \frac{1}{2} - \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}} q^p}{8\pi \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s) \Gamma(p) \gamma_{RD}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^a \binom{a}{b} \frac{1}{a!} \left(\frac{m}{\gamma_{SR}} \right)^{a-b+\frac{\alpha_s + \beta_s}{4}} \int_0^\infty \gamma^{\frac{\alpha_s + \beta_s}{4} + p + a - b - 1} \times \exp \left[\left(-q - \frac{m}{\gamma_{SR}} \right) \gamma \right] G_{5,0}^{5,1} \left[\frac{Am\gamma}{\gamma_{SR}} \middle| - \right]_{\kappa_1} d\gamma. \quad (20)$$

利用文献[15]计算式(20)可得:

$$\bar{P}_b = \frac{1}{2} - \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}} q^p}{8\pi \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s) \Gamma(p) \gamma_{RD}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^a \binom{a}{b} \frac{1}{a!} \left(\frac{m}{\gamma_{SR}} \right)^{a-b+\frac{\alpha_s + \beta_s}{4}} \times \left(q + \frac{m}{\gamma_{SR}} \right)^{b-a-p-\frac{\alpha_s + \beta_s}{4}} \times G_{1,5}^{5,1} \left[\frac{Am}{(m + q \gamma_{SR}) \gamma_{RD}} \middle| 1 - a + b - p - \frac{\alpha_s + \beta_s}{4} \right]_{\kappa_1}. \quad (21)$$

4.3 遍历容量

遍历容量是度量信道传输信息的最大能力的指标,表示为:

$$\langle C \rangle = E[\log_2(1 + \gamma)] = \frac{1}{\ln(2)} \int_0^\infty \frac{1 - F_\gamma(\gamma)}{1 + \gamma} d\gamma. \quad (22)$$

将式(18)代入到式(22)中,化简可得:

$$\langle C \rangle = \frac{(\alpha_s \beta_s)^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{2}}}{4\pi \ln(2) \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s) \gamma_{RD}^{\frac{(\alpha_s + \beta_s)}{4}}} \times \sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^a \binom{a}{b} \frac{1}{a!} \left(\frac{\gamma_{SR}}{m} \right) \times S \left[\begin{matrix} \left[\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right] & a - b + \frac{\alpha_s + \beta_s}{4} + 1, -; -\frac{\gamma_{SR}}{m} \\ \left(\begin{matrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right) & 0; 0 \\ \left(\begin{matrix} 0 & 5 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right) & -; \kappa_5 \\ & \frac{F}{\gamma_{SR}} \end{matrix} \right], \quad (23)$$

其中: $F = \frac{(\alpha_s \beta_s)^2}{16}$; $S[\cdot]$ 为扩展二元 Meijer G 函

数(Extended Generalized Bivariate Meijer G -function, EGBMGF); $K_5 = \frac{\alpha_s - \beta_s}{4}, \frac{\alpha_s - \beta_s + 2}{4}$,

5 仿 真

本文对系统端到端OP,ABER及遍历容量,

即式(18)、式(21)及式(23)进行仿真。假设通信距离为2 km,所采用的激光波长为1 550 nm,各接收器直径 $d=0.08$ m,它们的空间间隔设为 $l=\sqrt{\lambda L} \approx 5.57$ cm,以保证各条激光信道相互独立。取 $C_v^2=8 \times 10^{-13}$ 和 $C_v^2=6 \times 10^{-14}$ 分别代表强湍流和弱湍流两种情况,其对应的湍流系数分别为 $\alpha=6.75$, $\beta=1.06$ 和 $\alpha=4.21$, $\beta=2.28^{[17]}$ 。利用蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)^[18]模拟验证OP, ABER和遍历容量的闭合解析式的准确性,每次仿真针对每条链路的平均SNR值均生成 5×10^6 个随机数。对于S-R链路服从Nakagami- m 分布, R-D链路的接收端D处采用IM/DD检测。在相同信道条件下,对比了基于固定增益和可变增益的混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统性能,并分析了MIMO技术对中继系统性能的改善情况。

当R-D链路的平均SNR为10dB时,混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统的OP性能如图2所示。图2为中等湍流和强湍流条件下MIMO技术对混合中继系统OP性能的影响。从图2可以看出,中继系统的OP随着湍流的增强而变小。当S-R链路的平均SNR=40 dB时,在中等湍流时OP值为 4.8×10^{-4} ;而在强湍流条件下,OP值为 1.2×10^{-2} 。当 $M=N=4$ 时,在中等湍流和强湍流条件下OP值分别为 2.5×10^{-6} 和 2.6×10^{-6} 。可以看出,随着发射和接收孔径数目的增加,可以有效缓解由于大气湍流强度的增强而导致的系统OP值降低。不论在中等湍流情况下还是强湍流情况下,相比于 $M=N=1$ 时, $M=N=2$ 和 $M=N=4$ 时的OP性能都提高了很多。这也论证了使用MIMO技术可以很好地改善混合毫米波RF/FSO中继系统的性能。

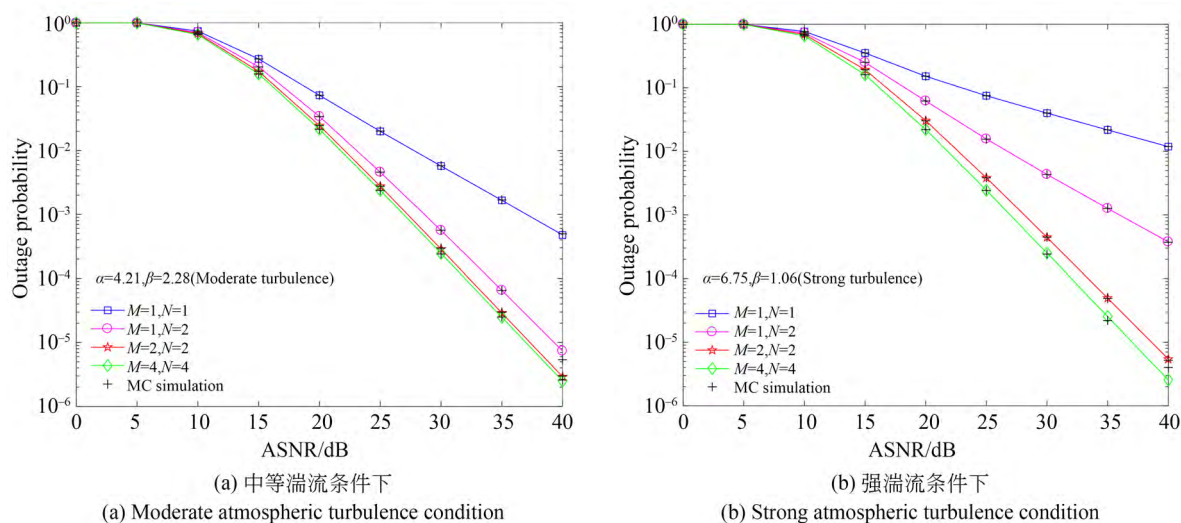


图2 MIMO技术对系统OP性能的影响

Fig. 2 Impact of MIMO technology on system OP performance

图3为采用DBPSK调制方式且R-D链路的平均SNR为10 dB时,MIMO技术对混合中继系统ABER性能的影响。从图3可以看出,大气湍流的存在会严重降低系统的ABER性能,且随着大气湍流强度的增加,系统ABER性能会不断恶化。当发射和接收孔径数目增加时,系统ABER性能会有明显改善。在S-R链路的平均SNR=40 dB时,当 $M=N=1$ 时,系统ABER性能只有 1.6×10^{-3} ;当 $M=1$, $N=2$ 时,系统ABER性能

可以达到 1.7×10^{-5} ;而当 $M=N=2$ 时和 $M=N=4$ 时,系统ABER性能可降至 10^{-8} 以下可见,随着收发孔径数目的增加,系统ABER性能的改善效果逐渐下降,与此同时,系统的复杂度和成本也不断提高。

图4为当R-D链路的平均SNR为10 dB时,不同湍流条件下的混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统遍历容量变化曲线。图4表明大气湍流会破坏中继系统的遍历容量。由图4(a)可看出,

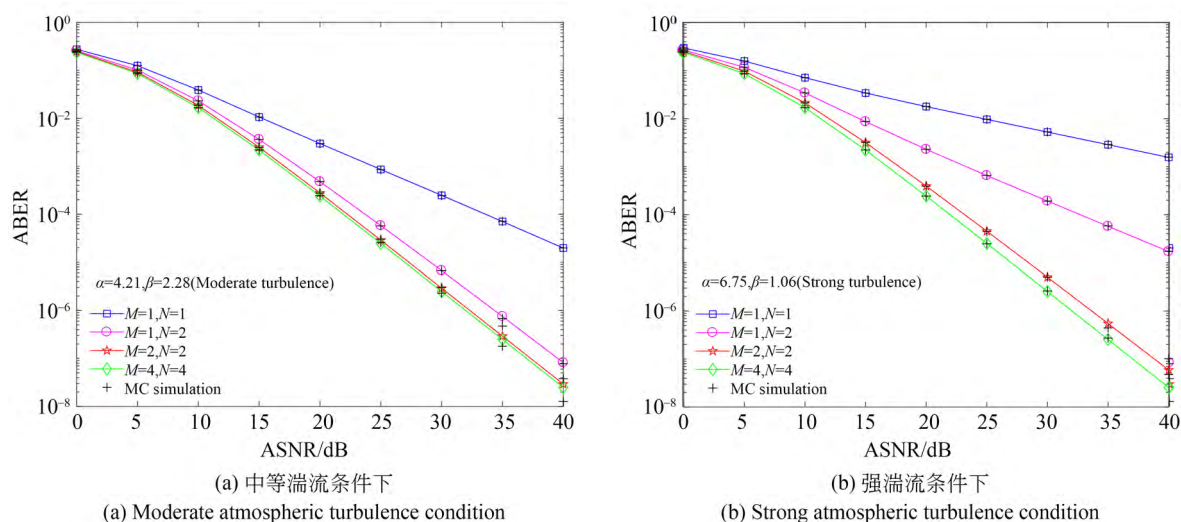


图3 MIMO技术对系统ABER性能的影响

Fig. 3 Impact of MIMO technology on system ABER performance

在中等湍流条件下 $M=N=4$ 时系统的遍历容量为 $13.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $M=N=2$ 时系统的遍历容量为 $13.4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $M=N=1$ 时系统的遍历容量为 $11.8 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. $M=N=2$ 时系统的遍历容量比 $M=N=1$ 时系统的遍历容量增加 $0.6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 由图 4(b) 可看出, 在强湍流条件下 $M=N=4$ 时系统的遍历容量为

$13.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $M=N=2$ 时系统的遍历容量为 $13.4 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, $M=N=1$ 时系统的遍历容量为 $11.0 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. $M=N=2$ 时系统的遍历容量比 $M=N=1$ 时系统的遍历容量增加 $1.5 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 这与系统 OP 和 ABER 的仿真结论一致. 另外, 仿真的数值结果与模拟结果完全匹配.

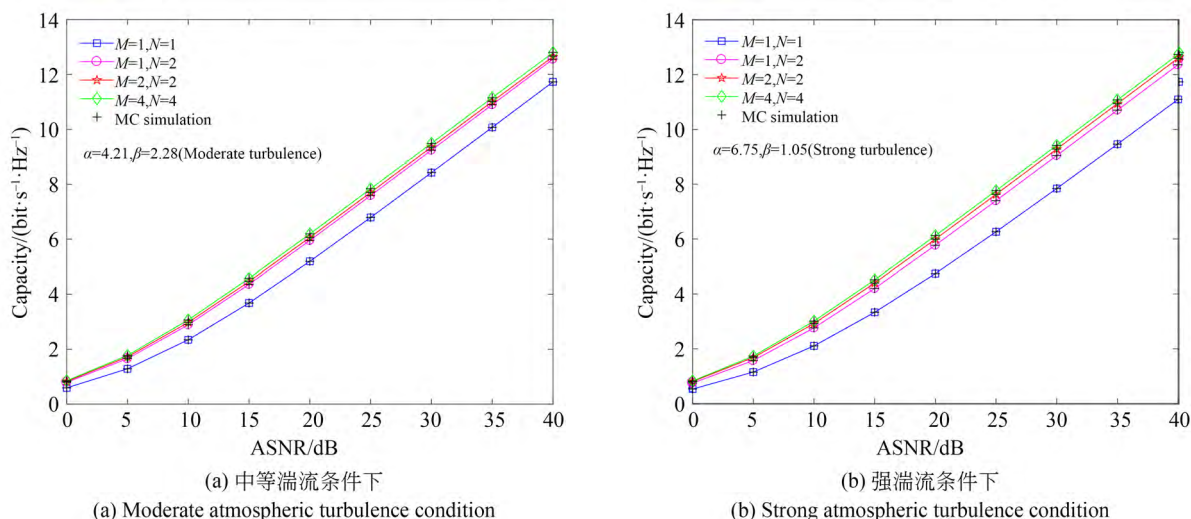


图4 MIMO技术对系统遍历容量的影响

Fig. 4 Impact of MIMO technology on system capacity performance

MC 数值仿真结果显示, MIMO 技术可以有效缓解由于大气湍流强度的增强而导致的混合

中继系统性能降低. 随着发射和接收孔径数目的增加, 混合中继系统性能逐渐增强, 但系统的

复杂度以及成本也不断提高,综合分析可知,发射和接收孔径数目都为2是MIMO-FSO链路的最佳选择。

6 结 论

本文构建了混合毫米波RF/MIMO-FSO中继系统,其中毫米波RF链路服从Nakagami- m 衰落,MIMO-FSO链路服从Gamma-Gamma分布,中继R处采用固定增益方案,接收端D处采用EGC方式合并多路信号。基于上述条件,利用

Meijer G函数推导出系统OP,ABER以及遍历容量的闭合形式表达式,并用MC模拟仿真验证了上述公式推导的准确性。数值仿真结果显示,MIMO技术可以有效解决由于大气湍流强度增强导致的混合中继系统性能降低。随着收发孔径数目的增加,混合中继系统性能逐渐增强,但与此同时系统的复杂度也不断提高。综合考虑系统性能、系统复杂度及成本等因素,在 $M=N=1$, $M=N=2$, $M=N=4$ 以及 $M=1$, $N=2$ 这4种不同的激光束和接收孔径的组合中, $M=N=2$ 是MIMO-FSO链路的最佳选择。

参考文献:

- [1] 王俊波,盛明,谢秀秀,等. 强湍流下并行中继自由空间光通信的中断分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 745-751.
WANG J B, SHENG M, XIE X X, *et al.* Outage analysis for parallel relay free-space optical communication in strong turbulence [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 745-751. (in Chinese)
- [2] WANG Z, SHI W X, LIU W, *et al.* Performance analysis of full duplex relay assisted mixed RF/FSO system [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126170.
- [3] ZHU Y L, XIN Y, KAM P Y. Outage probability of rician fading relay channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2648-2652.
- [4] NAKAGAMI M. *The m-distribution-A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading: Statistical Methods in Radio Wave Propagation* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1960: 3-36.
- [5] 曹明华,武鑫,杨顺信,等. Log-normal湍流信道中超奈奎斯特传输系统的误码性能[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 465-473.
CAO M H, WU X, YANG S H X, *et al.* BER performance of Faster-than-Nyquist communications under Log-normal turbulence channel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(2): 465-473. (in Chinese)
- [6] AL-HABASH M A. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1554.
- [7] ANSARI I S, YILMAZ F, ALOUINI M S. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(3): 351-354.
- [8] SHAKIR W M R. Performance analysis of the hybrid MMW RF/FSO transmission system [J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 109(4): 2199-2211.
- [9] TRINH P V, THANG T C, PHAM A T. Mixed mmWave RF/FSO relaying systems over generalized fading channels with pointing errors [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-14.
- [10] SOLIMAN S S, LEUNG V C M, BEAULIEU N C, *et al.* Analysis of general dual-hop AF systems over rician fading links [C]. 2015 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. *IEEE*, 2015: 1-6.
- [11] LUONG D A, PHAM A T. Average capacity of MIMO free-space optical gamma-gamma fading channel [C]. 2014 *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. June 10-14, 2014, Sydney, NSW, Australia. *IEEE*, 2014: 3354-3358.
- [12] 王卓. 非对称双跳混合RF/FSO中继系统模型构建与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
WANG ZH. *Model Construction and Performance Study of Asymmetric Dual-hop Mixed RF/FSO Relay System* [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [13] LEE E, PARK J, HAN D, *et al.* Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links [J]. *IEEE Photon-*

- ics Technology Letters, 2011, 23(21): 1642-1644.
- [14] HAN L Q, JIANG H B, YOU Y H, *et al.* On the performance of a mixed RF/MIMO FSO variable gain dual-hop transmission system[J]. *Optics Communications*, 2018, 420: 59-64.
- [15] 康凯. 混合 SIMO-RF/FSO 中继系统模型构建与性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
KANG K. *Model Establishment and Performance Analysis of Hybrid SIMO-RF/FSO Relay System* [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [16] 王惠琴, 王雪, 曹明华. 相关信道中光多输入多输出系统的误码率[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2142-2148.
WANG H Q, WANG X, CAO M H. Bit error rate of optical multiple input multiple output system in correlated channel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2142-2148. (in Chinese)

作者简介:



刘 维(1986—),女,吉林延边人,副教授,硕士生导师,2009年、2015年于吉林大学分别获得学士、博士学位,2017年博士后流动站出站,主要从事基于自适应光学的相干探测地形测绘激光雷达大气补偿关键技术、自由空间光通信大气信道补偿技术、基于深度学习的目标识别技术等方面的研究。E-mail: jdlw@jlu.edu.cn

通讯作者:



石文孝(1960—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1983年于长春邮电学院获得学士学位,1991年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事宽带无线移动通信网理论与技术、高速移动互联网理论与技术、无线光通信理论与技术等方面的研究。E-mail: swx@jlu.edu.cn