

一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析

韩立强, 江红兵

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 给出了一种串联衬底认知射频(RF)网络与多输入多输出(MIMO)自由空间光通信(FSO)链路的双跳传输系统,分析了其中断概率。对于射频链路,采用瑞利衰落分布模型,分析次级用户与主用户共享频谱的衬底认知无线网络;对于 MIMO FSO 链路,采用 Gamma-Gamma 大气湍流模型,考虑大气衰减效应和大气湍流效应,通过等增益合并建立 MIMO FSO 的信道模型。推导出中断概率的闭合表达式,仿真分析各种天气条件和大气湍流对串级链路的影响,结果显示随着次级用户发射器的峰值发射功率增大和发射孔径与接收孔径的数目增多,大气效应的影响逐渐减小,通信性能随之提高。

关键词 光通信; 自由空间光通信; 双跳中继系统; 中断概率; 衬底认知无线电

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0406001

Outage Probability Analysis of a Mixed Cognitive RF and MIMO FSO System

Han Liqiang, Jiang Hongbing

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

Abstract In this paper, we present a dual-hop transmission system composed of underlay cognitive radio frequency (RF) network cascaded with multiple input multiple output (MIMO) free-space optical communications (FSO) links, and analyze the outage probability. For the RF link, we use the Rayleigh fading distribution model and analyze an underlay cognitive radio network where the secondary users share the spectrum with licensed primary users. For the FSO link, we use the unified Gamma-Gamma turbulence distribution model to establish the MIMO FSO channel model derived with the equal gained diversity combined technique considering the effects of atmospheric attenuation and turbulence. We derive a new exact closed-form expression for the outage probability under fixed amplify-and-forward relay scheme. The influences of various weather conditions and turbulence strength on the cascade link are verified via computer simulations. The results indicate that the performance of the mixed underlay cognitive radio network and MIMO FSO system is increased and the atmospheric effect is decreased gradually with the increase of the peak transmission power of secondary user transmitters and the number of transmitting aperture and receiving aperture.

Key words optical communications; free-space optical communications; dual-hop relay system; outage probability; underlay cognitive radio

OCIS codes 060.2605; 010.1310; 010.1330

1 引 言

自由空间光通信(FSO)技术因具有频带宽、容量大、速率高、部署快捷等优点,受到人们的广泛关注。在机载通信系统中,可将其作为射频(RF)技术的备份来提高通信系统的性能和容量^[1-2]。然而光信号通过大气信道传输时会受到大气效应的影响,

导致光通信系统性能严重恶化。为了减小大气效应的影响,人们提出了由 RF 和 FSO 共同组成的混合机载通信系统^[2-3]。在这些混合 RF/FSO 系统中,RF 信道用于接入子链路,而空中骨干链路采用 FSO 技术。采用双跳中继传输技术可以进一步提高混合 RF/FSO 系统的可靠性和性能。近年来已有许多基于双跳中继传输技术的混合 RF/FSO 系

收稿日期: 2017-10-11; 收到修改稿日期: 2017-11-14

作者简介: 韩立强(1976—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事自由空间光通信方面的研究。

E-mail: ysdxhqlq@163.com

统的研究^[4-10]。文献[4]研究了在源节点(SN)到中继节点(RN)和中继节点(RN)到目的节点(DN)之间分别采用 Nakagami- m 分布和 Gamma-Gamma 分布的混合 RF/FSO 系统的性能。文献[5]研究了孔径平均作用下的混合 RF/FSO 系统模型,其中 RF 链路采用 Nakagami- m 分布、FSO 链路采用指数型 Weibull 大气湍流信道的同时考虑指向误差的影响。文献[6]提出了一种移动回程网络,在不同的子系统中又可构成不同的混合系统,如 RF/RF、RF/FSO、FSO/FSO 系统等,研究了 RF 链路采用 Rician 分布、FSO 链路采用 M 衰减分布的混合 RF/FSO 系统性能。文献[7-10]分别提出了 RF 链路由多个用户构成,而 FSO 链路仍是单输入单输出的混合 RF/FSO 系统,研究了系统在不同的中继传输方案、调制方案和信道模型下的性能。

另一方面,美国联邦通信委员会主导的光谱测量活动表明 RF 频谱的利用率偏低^[11]。为了缓解 RF 频谱的稀缺问题,认知无线网络(CRN)被提出。作为一种解决频谱限制的有效方法,CRN 能够通过智能共享频谱资源,显著提高无线网络的频谱效率^[12-13]。在频谱共享的方法中,由于衬底 CRN 技术简单,近几年其受到广泛关注^[14-15]。在衬底 CRN 中,主用户比次级用户拥有更高的优先级使用频谱,并且在主用户预先设定的干扰约束下,主用户和次级用户可以共存^[16]。

为了充分利用 CRN 的优势,最近已有学者致力于研究混合 CRN 和 FSO 系统。文献[17]初步描述了一种由 RF 链路和 FSO 信道级联的点到点之间的双跳传输系统,其中 RF 链路的衬底 CRN 服从瑞利分布,瞄准误差下的 FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布,并采用放大转发(AF)中继和副载波强度调制(SIM)方法,推导出系统的中断概率。文献[18]在文献[17]的基础上提出了由多输入多输出(MIMO)衬底 CRN 和 FSO 链路级联的混合系统,采用解码转发中继,得到系统的中断概率。文献[19]进一步提出了一种由 MIMO 衬底 CRN 和多目的节点的 FSO 链路构成的混合系统,采用放大转发中继和两种干扰消除方案,推导出系统的中断概率。基于文献[4-10]中的 RF 链路为非 CRN 的混合 RF/FSO 系统和文献[17-19]中的 RF 链路为 CRN 的混合 RF/FSO 系统,提出如图 1 所示的由衬底 CRN 和 MIMO FSO 级联的混合衰减信道。如图 1 所示,SN 与 RN 之间的衬底 CRN 分别由主基站及它的 N 个主用户(PU)和次级基站及它的 M 个次级用户(SU)组成。其中 h_m 和 h_{mp} 分别代表 m -th 次级用户发射器到次级基站和主基站的信道功率增益,同样 g_n 和 g_{ns} 分别代表 n -th 主用户发射器到主基站和次级基站的信道功率增益。其中 g_n 和 h_m 为期望信号, g_{ns} 和 h_{mp} 为干扰信号。

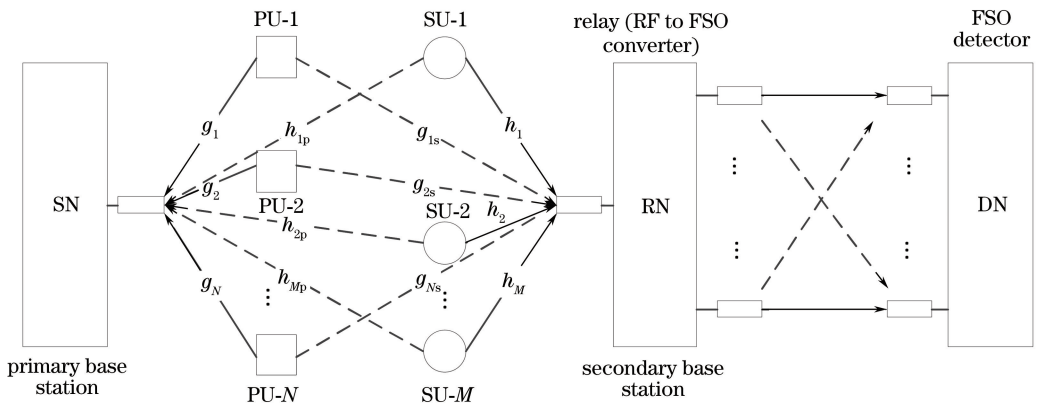


图 1 混合认知 CRN 和 MIMO FSO 系统框图

Fig. 1 System model block diagram of a mixed CRN and MIMO FSO

文献[20]表明,虽然固定增益的 AF 中继系统比可变增益中继系统性能稍差,但是固定增益的 AF 中继系统比可变增益中继系统具有更低的复杂度。文献[21]指出,在传输距离为 1 km 或者更长时,大气湍流的存在可能会导致 FSO 系统性能显著

降低。因此在实际通信系统中,混合 RF/FSO 中继通信系统能够成为有效的通信网络。文中仿真模拟了 RF/RF 链路和混合 RF/FSO 链路的中断概率,结果表明虽然混合 RF/FSO 链路性能比 RF/RF 链路性能略差,但随着平均信噪比(SNR)的增加,性能

差距逐渐减小。文献[22-23]均显示空间分集技术能有效地降低 FSO 系统的中断概率,提高系统性能。综合实践价值和经济效益,本文设计了如图 1 所示的固定增益的 AF 中继双跳传输系统,研究了衬底 CRN 与 MIMO FSO 链路的混合衰减信道。RF 链路为衬底认知(频谱共享)网络,其中主用户相对次级用户可以优先使用频谱,并且在主用户预先设定的干扰约束下允许主用户和次级用户共存,并假设认知网络服从瑞利分布。通过固定增益的 AF 中继系统,将接收到的 RF 信号经 SIM 转换为光信号传输到目的节点^[24]。FSO 信道服从 Gamma-Gamma 分布,采用开关键控(OOK)强度调制直接探测(IM/DD)。建立在大气衰减和大气湍流的联合效应下多输入多输出的信道模型和系统模型,推导混合信道的中断概率闭合表达式,分析不同湍流强度和各种天气条件下混合信道系统的中断概率。

2 系统和信道模型

如图 1 所示,设计了一个固定增益的放大转发中继双跳传输系统,在 SN 与 RN 之间采用衬底 CRN,允许主用户和次级用户共存;在 RN 与 DN 之间采用 FSO 链路,由 RN 将 SN 发射的 RF 信号经 SIM 转换为光信号,经由多个发射孔径和多个接收孔径发射到 DN。下面将详细介绍每条链路的信道模型。

2.1 RF 链路

由文献[25]可知,为了保证 RF 网络的传输质量,在主基站中由次级用户发射机产生的峰值干扰功率不能超过预定值 ψ ,对于每个主用户也叫做干扰温度(IT,用于表征非授权用户在共享频段内对授权用户接收机产生的干扰功率和授权接收机处系统噪声功率之和)。另外,假设次级用户发射器的峰值传输功率为 P_n ,所以次级用户传输功率为

$$P_{n,T} = \begin{cases} P_n, & \text{if } \psi \geq P_n h_{mp} \\ \frac{\psi}{h_{mp}}, & \text{if } \psi < P_n h_{mp} \end{cases} = \min\left(P_n, \frac{\psi}{h_{mp}}\right), \quad (1)$$

式中: h_{mp} 为图 1 中次级用户发射器与主用户接收器(主基站)之间的信道增益。由于该链路为衬底认知无线网络,所以其中的主用户相比次级用户可以优先使用频谱,并且在主用户预先设定的干扰温度下,主用户可以与次级用户共存。在没有干扰温度的情况下,即 RF 链路为非认知网络,其用户将一直以一个恒定的功率发射^[17]。

假设 RF 链路服从瑞利衰落分布,各自的信道功率增益将服从指数分布。由文献[25]可知,除去主网络产生的干扰,RF 链路的信噪比为

$$\gamma_{SR} = h_m P_{n,T} / \eta = h_m \bar{\gamma}_{SR} / \eta, \quad (2)$$

式中: h_m 为图 1 中次级用户发射器和次级用户接收器(次级基站)之间的信道; $\bar{\gamma}_{SR}$ 为 SN 与 RN 链路的平均信噪比(SNR); η 为热加性高斯白噪声(AWGN)。

2.2 FSO 链路

经历大气衰减效应和大气湍流效应的 MIMO FSO 链路服从 Gamma-Gamma 分布,它的 SNR 的概率密度(PDF)为^[22]

$$f_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) = \frac{(\alpha_S \beta_S)^{(\alpha_S + \beta_S)/2} \gamma_{RD}^{[(\alpha_S + \beta_S)/4 - 1]}}{2 h_1^{(\alpha_S + \beta_S)/2} \bar{\gamma}_{RD}^{(\alpha_S + \beta_S)/4} \Gamma(\alpha_S) \Gamma(\beta_S)} \times G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha_S \beta_S}{h_1} \sqrt{\frac{\gamma_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD}}} \left| \frac{\alpha_S - \beta_S}{2}, \frac{\beta_S - \alpha_S}{2} \right. \right], \quad (3)$$

式中: $\alpha_S = MN\alpha + \epsilon$, $\beta_S = MN\beta$, M 、 N 分别为 FSO 链路发射器、接收器个数, α 、 β 的值决定大气湍流强度, ϵ 为误差调整参数, $\epsilon = (MN - 1) \times \frac{-0.127 - 0.95\alpha - 0.0058\beta}{1 + 0.00124\alpha + 0.98\beta}$; h 为等增益合并后 MN 个信道状态 h_{mn} 的和, $h_{mn} = h_1 h_a$, $h_1 = \exp(-\sigma z)$, h_1 为传输一定距离 z 后所引起的大气损耗, σ 为衰减系数, h_a 为大气湍流引起的光强随机衰减; γ_{RD} 为 FSO 链路的瞬时信噪比; $\bar{\gamma}_{RD}$ 为 FSO 链路的平均信噪比; $\Gamma()$ 为 Gamma 函数; $G()$ 为 Meijer'G 函数。

2.3 中继系统

本文采用固定增益的 AF 中继系统,由中继系统将接收到的 RF 信号经 SIM 转换为光信号传输到 DN。文献[20]已经推导出系统的点到点之间的 SNR 为

$$\gamma = \frac{\gamma_{SR} \gamma_{RD}}{\gamma_{RD} + C}, \quad (4)$$

式中: C 为中继的固定增益。

3 中断概率分析

中断概率是度量通信传输可靠性的物理量,它是指系统信噪比低于某一目标信噪比门限值 γ 的概率。信噪比的大小将对系统中断概率产生重要的影响,中断概率定义为^[20]

$$P_{out} = \Pr \left[\frac{\gamma_{SR} \gamma_{RD}}{\gamma_{RD} + C} < \gamma \right], \quad (5)$$

又可写为

$$p_{\text{out}} = \int_0^{\infty} \Pr \left[\frac{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}} + C} < \gamma \right] f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}, \quad (6)$$

式中: $\Pr(\cdot)$ 表示概率函数, $\Pr \left[\frac{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}} + C} < \gamma \right] = F_{\gamma_{\text{SR}}} \left[\frac{\gamma(\gamma_{\text{RD}} + C)}{\gamma_{\text{RD}}} \right]$ 。在假设 $\eta=1$ 的情况下, 参照文

献[25]中(5)式可知, SN 到 RN 链路的累积分布函数 $F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{SR}})$ 为

$$F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{SR}}) = 1 - \exp(-\gamma_{\text{SR}}/P_n) + \gamma_{\text{SR}}/(\psi + \gamma_{\text{SR}}) \exp[-(\gamma_{\text{SR}} + \psi)/P_n], \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式中可得

$$p_{\text{out}} = \underbrace{\int_0^{\infty} f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}}_{L_1} - \underbrace{\exp\left(-\frac{\gamma}{P_n}\right) \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma C}{P_n} \gamma_{\text{RD}}^{-1}\right) f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}}_{L_2} + \underbrace{\exp\left(-\frac{\psi + \gamma}{P_n}\right) \int_0^{\infty} \frac{\gamma \gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}}(\psi + \gamma) + \gamma C} \exp\left(-\frac{\gamma C}{P_n} \gamma_{\text{RD}}^{-1}\right) f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}}_{L_3} + \underbrace{\exp\left(-\frac{\psi + \gamma}{P_n}\right) \int_0^{\infty} \frac{\gamma C}{\gamma_{\text{RD}}(\psi + \gamma) + \gamma C} \exp\left(-\frac{\gamma C}{P_n} \gamma_{\text{RD}}^{-1}\right) f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{RD}}) d\gamma_{\text{RD}}}_{L_4}。 \quad (8)$$

式中: 积分 L_1 为 1; 积分 L_2 中 $\exp\left(-\frac{\gamma C}{P_n} \gamma_{\text{RD}}^{-1}\right)$ 可以通过文献[26]中(07.34.03.228.01)式和文献[27]中(6.22)式化简为 $G_{1,0}^{0,1} \left[\frac{P_n}{\gamma C} \gamma_{\text{RD}} \middle| \begin{matrix} 1 \\ - \end{matrix} \right]$, 故利用文献[28]中(21)式积分 L_2 化简为

$$L_2 = A_1 \exp\left(-\frac{\gamma}{P_n}\right) G_{0,5}^{5,0} \left[B_1 \middle| \begin{matrix} - \\ k_1 \end{matrix} \right], \quad (9)$$

式中: $A_1 = \frac{(\alpha_s \beta_s)^{(\alpha_s + \beta_s)/2} (P_n / \gamma C)^{-(\alpha_s + \beta_s)/4}}{4\pi h_1^{(\alpha_s + \beta_s)/2} \bar{\gamma}_{\text{RD}}^{(\alpha_s + \beta_s)/4} \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)}$, $B_1 = \frac{\alpha_s^2 \beta_s^2 C \gamma}{16 \bar{\gamma}_{\text{RD}} h_1^2 P_n}$, $k_1 = \frac{\alpha_s - \beta_s}{4}$, $\frac{\alpha_s - \beta_s + 2}{4}$, $\frac{\beta_s - \alpha_s}{4}$, $\frac{\beta_s - \alpha_s + 2}{4}$, $-\frac{\alpha_s + \beta_s}{4}$ 。通过文献[29]中第 152 页中

$(1 + az)^{-b} = \frac{1}{\Gamma(b)} G_{1,1}^{1,1} \left[az \middle| \begin{matrix} 1-b \\ 0 \end{matrix} \right]$, 积分 L_3 和 L_4 中 $\gamma C / [(\psi + \gamma) \gamma_{\text{RD}} + \gamma C]$ 可化为 $G_{1,1}^{1,1} \left[\frac{\psi + \gamma}{\gamma C} \gamma_{\text{RD}} \middle| \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \right]$ 。而后通过文献[27]中(6.2.8)和(6.2.3)式得到 3 个 Fox's H 函数, 并由文献[30]中(2.3)式将 L_3 和 L_4 化简为双变量 Fox's H 函数, 如下所示:

$$L_3 = A_2 \exp\left(-\frac{\psi + \gamma}{P_n}\right) \times H \left[\begin{matrix} (0,2) \\ (2,0) \\ (1,1) \\ (1,1) \\ (0,1) \\ (1,0) \end{matrix} \middle| \begin{matrix} k_2 \\ - \\ (0,1) \\ (1,1) \\ (1,1) \\ - \end{matrix} \right] \begin{matrix} B_2 \\ \\ B_3 \end{matrix}, \quad (10)$$

式中: $A_2 = \frac{h_1^2 \bar{\gamma}}{C \alpha_s^2 \beta_s^2 \Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)}$; $k_2 = (-\alpha_s - 1; 2, 2)$, $(-\beta_s - 1; 2, 2)$; $B_2 = \frac{(\gamma + \psi) h_1^2 \bar{\gamma}}{C \alpha_s^2 \beta_s^2 \gamma}$; $B_3 = \frac{P_n h_1^2 \bar{\gamma}}{C \alpha_s^2 \beta_s^2 \gamma}$ 。

$$L_4 = A_3 \exp\left(-\frac{\psi + \gamma}{P_n}\right) \times H \left[\begin{matrix} (0,2) \\ (2,0) \\ (1,1) \\ (1,1) \\ (0,1) \\ (1,0) \end{matrix} \middle| \begin{matrix} k_3 \\ - \\ (0,1) \\ (1,1) \\ (1,1) \\ - \end{matrix} \right] \begin{matrix} B_2 \\ \\ B_3 \end{matrix}, \quad (11)$$

式中: $A_3 = \frac{1}{\Gamma(\alpha_s) \Gamma(\beta_s)}$; $k_3 = (1 - \alpha_s; 2, 2)$, $(1 - \beta_s; 2, 2)$ 。故将 $L_1=1$ 和(9)~(11)式代入(8)式可得到中断概率 p_{out} 的封闭形式, 最后通过 Mathematica 和 Matlab 进行仿真模拟。

4 仿真及结果分析

基于上述推导的中断概率闭合表达式, 仿真分析了干扰温度为 10 W 时, 大气湍流效应和大气衰减效应对混合链路中断概率的影响。为了尽可能模拟实际情况, 假设波长为 $\lambda = 1550$ nm, 传输距离 $L = 1000$ m, 接收孔径和发射孔径直径均为 $D = 20$ cm, 要保证信道独立, 各个接收孔径间距必须大于相关长度 $\sqrt{\lambda L} \approx 3.9$ cm, 表 1 和表 2 分别给出了各种典型天气条件下对应的参数及系统的其他各参数值^[21]。根据这些参数进行数值模拟分析, 同时通过蒙特卡罗仿真来验证公式的正确性, 由文献[31]可知, 两个独立的

服从 Gamma 分布的随机变量的乘积服从 Gamma-Gamma 分布,故在蒙特卡罗仿真中,由两个独立的服从 Gamma 分布的随机变量的乘积产生服从 FSO 链

路 PDF 的 Gamma-Gamma 分布的样本点,进而进行蒙特卡罗仿真。为了降低仿真的统计不确定性,在每次仿真中产生 10^8 个随机数进行计算。

表 1 各种天气条件下的能见度和衰减系数(波长为 1550 nm)

Table 1 Visibility and attenuation coefficients for various atmospheric conditions at 1550 nm wavelength

Weather condition	Clear air	Drizzle	Haze	Light fog
Visibility /km	50.0	20.0	6.0	2.0
Attenuation coefficient /($\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$)	0.0647	0.2208	0.7360	4.2850

表 2 系统参数的取值

Table 2 Parameters configuration of the system

Parameter	Fixed relay gain C	Average SNR of FSO link $\bar{\gamma}_{\text{RD}}/\text{dB}$	Threshold γ/dB	Interference temperature ψ/W	Strong turbulence		Weak turbulence	
					α	β	α	β
Value	1.1	17	0.16	10	2.064	1.342	2.902	2.51

图 2 和图 3 分别模拟了 FSO 链路在单输入单输出 ($M=1, N=1$) 及强弱湍流的情况下,晴天、毛毛雨、霾和雾的天气条件对系统中断概率的影响。当天气条件逐渐恶化时,中断概率逐渐增大,其中雾天对系统中断概率的影响尤为严重。图 2 的数值计算结果和蒙特卡罗仿真结果基本吻合,验证了(8)式理论的正确性。同时从图 2 可知,系统在弱湍流条件下,峰值发射功率为 20 dBW 时,晴天的中断概率约为 4.3×10^{-3} ;毛毛雨的中断概率约为 5.1×10^{-3} ;霾的中断概率约为 1.0×10^{-2} ;而雾的中断概率增加了 2、3 个数量级,约为 0.3。由图 2 和图 3 对比可知,当湍流强度增强时,中断概率增大。如当系统在晴天、毛毛雨和霾的天气条件下,峰值发射功率为 20 dBW 时,系统在强湍流条件下的中断概率比弱湍流条件下增加了 1 个数量级,而在雾天条件下中断概率增加较小。这是因为在雾天的条件下,信道性能衰落严重,此时大气湍流导致的信道衰落对系统的性能影响较小。

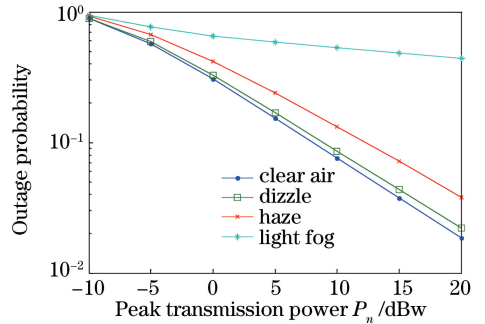


图 3 强湍流不同天气条件下中断概率与峰值发射功率的关系
Fig. 3 Outage probability versus peak transmission power in strong turbulence under different weather conditions

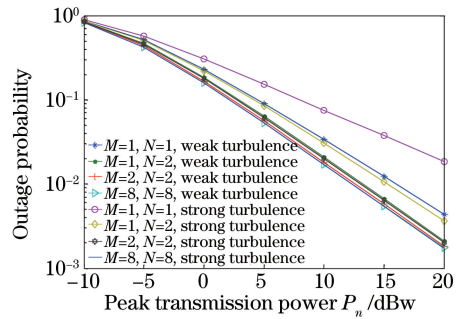


图 4 中断概率在强弱湍流、晴天条件下与峰值发射功率的关系
Fig. 4 Outage probability versus peak transmission power in weak and strong turbulences with fine days

示强湍流,其分别模拟了系统的中断概率在强弱湍流及晴天、毛毛雨、霾和雾的天气条件下与次级用户发射器的峰值发射功率的关系。从图中可以得到相同的结论,当湍流强度由弱到强变化时,中断概率逐渐增大且强湍流对系统中断概率的影响较为严重。并由图可知,当发射器和接收器的个数逐渐增加时,系统的中断概率在不同的湍流强度和各种天气条件下都显著降低。在天气条件较好的图 4~6 中,当系

图 4~7 的图例中前 4 个表示弱湍流,后 4 个表

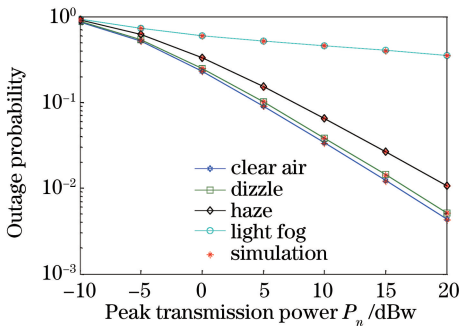


图 2 弱湍流不同天气条件下中断概率与峰值发射功率的关系
Fig. 2 Outage probability versus peak transmission power in weak turbulence under different weather conditions

统分别在强弱湍流条件下和峰值发射功率为 20 dBw时,发射孔径数目 M 和接收孔径的数目 N 从 $M=1, N=1$ 增加到 $M=8, N=8$ 时,系统的中断概率均大约降低了 1 个数量级。而在天气条件较差的图 7 中,当增加发射孔径和接收孔径数目时,系统的中断概率也降低了约 1 个数量级,这表明空间分集技术能有效地降低天气条件对系统中中断概率的影响。在图 4~6 中,当峰值发射功率为 20 dBw 时,相同数目的发射孔径和接收孔径的强弱湍流的中断概率差值随着其数目的增多而明显降低。由于雾天对信道性能衰落严重,图 7 的差值减小幅度较小,但从图中可以发现其仍有减小。这表明空间分集技术降低了湍流强度对系统中中断概率的影响。综上所述,增加发射孔径数目 M 和接收孔径数目 N ,可以有效地降低大气衰减和大气湍流对系统中中断概率的影响。并从图 4~7 可知, $M=1, N=2$ 时降幅最大, $M>2, N>2$ 以后降低的幅度有限。从系统复杂度和性能提高程度考虑,选择 2 个发射孔径和 2 个接收孔径 ($M=2, N=2$) 比较合适。

由图 2~7 均可看出,系统的中断概率随着次级用户发射功率的增加而逐渐减小。如在单输入单输出的图 2 和图 3 中,当峰值发射功率从 -10 dBw 增加到 20 dBw 时,弱湍流条件下的晴天、毛毛雨及霾的系统中断概率下降了约 2~3 个数量级,雾天的系统中中断概率也下降了约 1 个数量级。强湍流条件下的晴天、毛毛雨及霾的系统中断概率下降了约 1~2 个数量级,雾天的系统中中断概率也下降了约 1 个数量级。这表明增大峰值发射功率能够有效地减弱大气衰减和大气湍流对系统中中断概率的影响,因此可以通过增加次级用户的峰值发射功率来降低系统的中断概率。

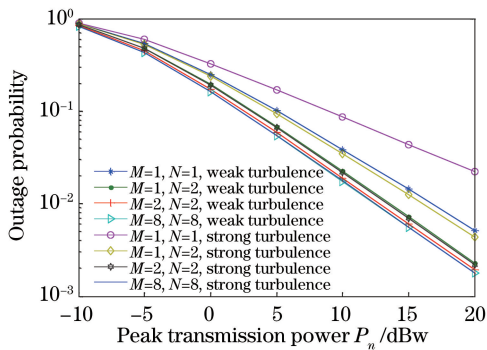


图 5 中断概率在强弱湍流、毛毛雨条件下与峰值发射功率的关系
Fig. 5 Outage probability versus peak transmission power in weak and strong turbulences under drizzle condition

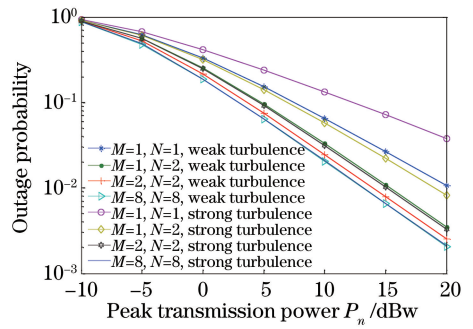


图 6 中断概率在强弱湍流、霾条件下与峰值发射功率的关系
Fig. 6 Outage probability versus peak transmission power in weak and strong turbulences under haze condition

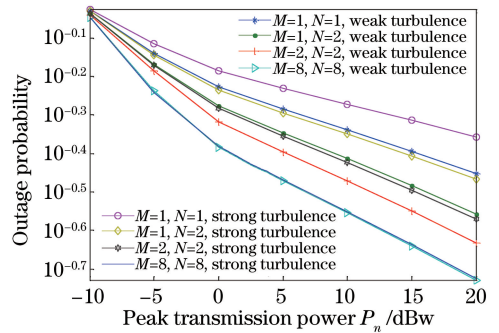


图 7 中断概率在强弱湍流、轻雾条件下与峰值发射功率的关系
Fig. 7 Outage probability versus peak transmission power in weak and strong turbulences under light fog condition

5 结 论

研究了混合衬底认知无线网络和多输入多输出自由空间光通信链路的双跳传输系统的中断概率,得到了封闭形式的基于 Meijer's G 函数和广义双变量 Fox's H 函数的中断概率表达式。理论模拟了在大气湍流从弱到强变化和各种天气条件如晴天、毛毛雨、霾和雾对系统中中断概率的影响,结果显示通过增加衬底认知无线网络中次级用户发射器的峰值发射功率和多输入多输出自由空间光通信链路发射孔径和接收孔径的数量,大气效应对系统的影响逐渐减小,混合系统的性能也随之提高。综合考虑系统复杂度和性能提高程度,认为选择 2 个接收孔径和 2 个发射孔径 ($M=2, N=2$) 较为合适。该结果证实:在提出的混合衬底认知无线网络和多输入多输出自由空间光通信链路的系统中,通过衬底认知无线网络主用户和次级用户共享频谱,同时增加多输入多输出自由空间光通信链路的发射器和接收器数量,显著降低了大气湍流效应和大气衰减效应对系统通信性能的影响。

参 考 文 献

- [1] Stotts L B, Stadler B, Lee G. Free space optical communications: coming of age[C] // Proceedings of SPIE Atmospheric Propagation V, 2008, 6951: 69510W.
- [2] Stotts L B, Andrews L C, Cherry P C, *et al.* Hybrid optical RF airborne communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 1109-1127.
- [3] Bagley Z C, Hughes D H, Juarez J C, *et al.* Hybrid optical radio frequency airborne communications[J]. Optical Engineering, 2012, 51(5): 055006.
- [4] Anees S, Bhatnagar M R. Performance evaluation of decode-and-forward dual-hop asymmetric radio frequency-free space optical communication system [J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 232-240.
- [5] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, *et al.* Performance analysis for mixed RF/FSO airborne communication systems over atmospheric turbulence and pointing error[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906001.
赵静, 赵尚弘, 赵卫虎, 等. 大气湍流和指向误差下混合 RF/FSO 航空通信系统性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906001.
- [6] 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): 5500414.
- [7] Soleimani-Nasab E, Uysal M. Generalized performance analysis of mixed RF/FSO cooperative systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 714-727.
- [8] Zedini E, Ansari I S, Alouini M S. Performance analysis of mixed Nakagami- m and Gamma-Gamma dual-hop FSO transmission systems [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 7900120.
- [9] Miridakis N I, Matthaïou M, Karagiannidis G K. Multiuser relaying over mixed RF/FSO links [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(5): 1634-1645.
- [10] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, *et al.* Performance of mixed RF/FSO systems in exponentiated Weibull distributed channels [J]. Optics Communications, 2017, 405: 244-252.
- [11] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [12] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, *et al.* NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [13] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [14] Ekin S, Abdallah M M, Qaraqe K A, *et al.* Random subcarrier allocation in OFDM-based cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(9): 4758-4774.
- [15] Lee J, Wang H, Andrews J G, *et al.* Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 390-395.
- [16] Zhong C, Ratnarajah T, Wong K K. Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami- m fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2875-2879.
- [17] Ansari I S, Abdallah M M, Alouini M S, *et al.* Outage performance analysis of underlay cognitive RF and FSO wireless channels [C] // IEEE 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW), 2014: 6-10.
- [18] Varshney N, Jagannatham A K. Cognitivedecode-and-forward MIMO-RF/FSO cooperative relay networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(4): 893-896.
- [19] Al-Qahtani F S, El-Malek A H A, Ansari I S, *et al.* Outage analysis of mixed underlay cognitive RF MIMO and FSO relaying with interference reduction [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7902722.
- [20] Hasna M O, Alouini M S. A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays [C] // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(6): 1963-1968.
- [21] Lee E, Park J, Han D, *et al.* Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(21): 1642-1644.
- [22] Han L Q, You Y H. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0706004.
韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.
- [23] Zhang H Y, Li H Z, Xiao D Y, *et al.* Performance analysis of spatial-diversity reception over combined effects of atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of 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.
- [24] Popoola W O, Ghassemlooy Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(8): 967-973.
- [25] Ekin S, Abdallah M M, Qaraqe K A, *et al.* Random subcarrier allocation in OFDM-based cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(9): 4758-4774.
- [26] Wolfram I. *Mathematica Edition: Version 8.0*[M]. Champaign, Illinois: Wolfram Research Inc, 2010.
- [27] Springer M D. *The algebra of random variables*[M]. New York: Wiley, 1979: 197-198.
- [28] 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.
- [29] Mathai A M, Saxena R K. *The H function with applications in statistics and other disciplines* [M]. New York: Wiley Eastern, 1978: 152.
- [30] Mittal P K, Gupta K C. An integral involving generalized function of two variables [C] // *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*. Springer India, 1972, 75(3): 117-123.
- [31] Chatzidiamantis N D, Karagiannidis G K. On the distribution of the sum of Gamma-Gamma varieties and applications in RF and optical wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(5): 1298-1308.