

激光与光电子学进展

基于 Málaga 湍流信道和 Nakagami 衰弱信道的选择合并混合 FSO/RF 系统的性能分析

吴琰^{1,2,3,4}, 戴聪明^{2,4}, 赵凤美^{2,3,4}, 魏合理^{2,3,4*}¹淮南师范学院电子工程学院, 安徽 淮南 232038;²中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;³中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;⁴安徽省先进激光技术实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 在 Málaga 湍流信道和 Nakagami- m 衰弱信道条件下,对基于选择合并技术的混合自由空间光/射频(FSO/RF)通信系统性能进行研究。在考虑指向性误差的情况下,推导了采用副载波调制和强度调制直接检测方案的混合 FSO/RF 系统的平均误码率和中断概率表达式,并利用 Meijer G 函数和扩展广义双变量 Meijer G 函数获得其闭合解。在不同的副载波调制方式、湍流强度、指向性误差及 RF 信道衰弱参数情况下,分别分析混合 FSO/RF 系统和单 FSO 系统的误码率和中断概率。仿真结果表明,相比单 FSO 系统,混合 FSO/RF 通信系统能有效提升通信系统性能。

关键词 大气光学; 混合自由空间光/射频通信系统; Málaga 湍流信道; Nakagami- m 衰弱信道; 平均误码率; 中断概率

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP58.0101002

Performance Analysis of Selection Combining Hybrid FSO/RF System Over Málaga Turbulence Channel and Nakagami Fading Channel

Wu Yan^{1,2,3,4}, Dai Congming^{2,4}, Zhao Fengmei^{2,3,4}, Wei Heli^{2,3,4*}¹College of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China;²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;³Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;⁴Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract This study investigates the performance of the hybrid free space optical/radio frequency (FSO/RF) communication system based on the selective combination technology under the conditions of the Málaga turbulent channel and the Nakagami- m fading channel. Considering the pointing errors, we deduce the expressions of the average bit error rate and the outage probability of the hybrid FSO/RF system that adopts the subcarrier modulation and intensity modulation direct detection scheme. Their closed-form solutions are then obtained using the Meijer G function and the extended generalized bivariate Meijer G function. The bit error rate and the outage probability performances of the hybrid FSO/RF and only-FSO systems are investigated under different subcarrier modulation

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-06-08

基金项目: 国家重点研发项目(2019YF0706004)、装备预研基金(41416020204)、安徽省教育厅 2018 年度高校科学研究重点项目(KJ2018A0464)

*E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn

schemes, turbulence intensities, pointing errors, and RF channel fading parameters. The simulation results show that compared with the only-FSO system, the hybrid FSO/RF communication system can effectively improve the communication system performance.

Key words atmospheric optics; hybrid free space optical/radio frequency communication system; Málaga turbulence channel; Nakagami- m fading channel; average bit error rate; outage probability

OCIS codes 010.3310; 060.2605; 060.4510

1 引言

自由空间光(FSO)通信是一种以激光为信息载体,在视线无遮挡的大气信道中进行点对点传输的无线通信技术。FSO 通信系统结合了微波通信和光纤通信的优点,具有传输容量大、建网速度快、无需授权、保密性好等特点,通常用作电信“最后一千米”或者楼宇之间 LAN 链路。然而,地面 FSO 通信系统性能除了受大气信道影响外,如天气影响(云、雾、雨、雪、气溶胶等粒子对光的散射)和光学湍流影响等,还受系统指向性误差影响^[1]。

为了减小大气环境对地面 FSO 通信系统性能的影响并提高无线光通信系统的可靠性和可用性,一种将 FSO 链路和毫米波射频(RF)链路相结合形成的混合 FSO/RF 通信系统的方案被提出。混合 FSO/RF 通信系统可以分为两类:模式切换系统和同步传输系统。在模式切换的混合 FSO/RF 系统中,RF 链路充当备用连接,只有当主 FSO 链路的瞬时信噪比低于预定义的阈值时,系统才切换到该链路。Usman 等^[2]提出了一种用于混合 FSO/RF 系统的低复杂度硬件交换方案,其中 FSO 链路采用 Lognormal 湍流模型,RF 链路采用 Nakagami- m 衰落模型。Touati 等^[3]研究了指向性误差对模式切换的混合 FSO/RF 系统性能的影响,其中 FSO 链路采用 Gamma-Gamma 湍流模型,RF 链路采用 Rician 衰落模型。然而,这种模式切换系统在很大程度上依赖于系统收发器上反馈信息或信道状态信息(CSI)的可用性,增加了系统的硬件复杂度。

另一方面,在同步传输混合系统中,相同的数据会在两个链路上同时传输,系统接收端对接收到的两路信号进行分集合并(常用三种合并技术:最大比合并、等效增益合并、选择合并)处理后再进行信号的解调。因此,这种方案不需要反馈信息或 CSI 来实现两条链路之间的切换操作,与模式切换系统相比,同步传输系统具有更简单、更经济的优点。Shakir^[4]研究了指向性误差对采用选择合并技术的同步传输混合 FSO/RF 系统性能的影响,其中 FSO 链路采用 Gamma-Gamma 湍流模型,RF 链路采用 Nakagami- m

衰落模型。Odeyemi 等^[5]研究了指向性误差和不含指向性误差对采用选择合并技术的同步传输混合 FSO/RF 系统性能的影响,其中 FSO 链路采用 Málaga 湍流模型,RF 链路采用 η - μ 衰落模型。

本文首先分别给出 FSO 链路的 Málaga 湍流模型和 RF 链路的 Nakagami- m 衰落模型,并推导出采用选择合并方案的混合 FSO/RF 通信系统的输出信噪比的累计分布函数;再利用 Meijer G 函数和扩展广义双变量 Meijer G 函数推导出混合 FSO/RF 系统的平均误码率(BER)和中断概率的闭合解;最后,在不同的通信条件下对混合 FSO/RF 系统性能进行仿真分析。

2 系统与信道模型

在混合 FSO/RF 系统的发射端,信号经二进制调制和副载波预调制后被分离为两支信号,两支信号分别通过 FSO 和 RF 发射机调制到载波上并发射到通信链路中,接收端选择具有最大信噪比的链路信号进行输出。

2.1 FSO 链路

FSO 链路采用基于副载波强度调制(SIM)技术的强度调制/直接检测(IM/DD)方案。预调制电副载波信号 $m(t)$ 对连续激光光束进行调制,则调制后光束的发射功率可以表示为 $P_t^{\text{FSO}} = P^{\text{FSO}} [1 + \xi m(t)]$, P^{FSO} 为 FSO 链路中发射机的平均发射功率, ξ 为调制指数且满足 $-1 < \xi m(t) < 1$, 以防止过调制,为了简便, ξ 为 1。在接收端,光电探测器通过直接检测的方式将接收到的激光光束转换为电信号,且副载波信号将进一步解调为原始的二进制信号,因此光电探测器的输出信号 y^{FSO} ^[6] 为

$$y^{\text{FSO}} = P^{\text{FSO}} R [1 + \xi m(t)] h^{\text{FSO}} + n_0, \quad (1)$$

式中: R 为光电探测器的响应率; n_0 为均值为 0 且方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声; h^{FSO} 为 FSO 链路的信道增益。在光接收机电解调器的输入端,瞬时信噪比(SNR) γ^{FSO} ^[7] 可以表示为

$$\gamma^{\text{FSO}} = \frac{(P^{\text{FSO}} R \xi)^2}{\sigma_n^2} \times (h^{\text{FSO}})^2 = \bar{\gamma}^{\text{FSO}} \times (h^{\text{FSO}})^2, \quad (2)$$

式中: $\bar{\gamma}^{\text{FSO}}$ 为平均电信噪比。在仅考虑 Málaga 大

气湍流和指向性误差的情况下,在 FSO 链路中,瞬时电噪比 γ^{FSO} 的概率密度函数(PDF)^[8]为

$$f(\gamma^{\text{FSO}}) = (\gamma^{\text{FSO}})^{-1} \frac{g^2 A}{4} \sum_{k=1}^{\beta} c_k G_{1,3}^{3,0} \left(B \sqrt{\frac{\gamma^{\text{FSO}}}{\chi^{\text{FSO}}}} \left| \begin{matrix} 1 + g^2 \\ g^2, \alpha, k \end{matrix} \right. \right), \quad (3)$$

式中: $g = \omega_{\text{Leq}} / 2\sigma_s$, 是接收机平面等效光束半径 (ω_{Leq}) 与接收机平面的抖动标准差 (σ_s) 之比; $G_{\cdot, \cdot}^{\cdot, \cdot}(\cdot)$ 为 Meijer G 函数; $B = g^2 \alpha \beta (\mu + \Omega') / [(g^2 + 1)(\mu \beta + \Omega')]$; $c_k = a_k B^{-\frac{\alpha+k}{2}}$; χ^{FSO} 为修正平均信噪比。

$$\begin{cases} \chi^{\text{FSO}} = \frac{g^2 (g^2 + 1)^{-2} (g^2 + 2) (\mu + \Omega')}{\alpha^{-1} (\alpha + 1) [2\mu (\mu + 2\Omega') + \Omega'^2 (1 + 1/\beta)]} \bar{\gamma}^{\text{FSO}} \\ A = \frac{2\alpha^{\alpha/2}}{\mu^{1+\alpha/2} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\mu\beta}{\mu\beta + \Omega'} \right)^{\beta + \frac{\alpha}{2}} \\ a_k = \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\mu\beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{(k-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\mu} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{k/2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: α 为正参数,与散射过程中大尺度涡旋的有效个数有关; β 为衰弱参数,是一个自然数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; 离轴涡旋路径接收到独立散射分量的平均功率 $\mu = E[|U_S^c|^2] = 2b_0(1-\rho)$, 总散射分量的平均功率 $2b_0 = E[|U_S^c|^2 + |U_S^o|^2]$; ρ 为与视线分量耦合的散射功率值, $0 \leq \rho \leq 1$; U_S^c 为在与视线分量相耦合的传播轴(同轴)上, 涡旋引起的准前向散射分量; U_S^o 为离轴路径上涡旋对光能量产生的独立散射分量; 相互耦合分量的平均功率 $\Omega' = \Omega + 2b_0\rho + 2\sqrt{2b_0\rho\Omega} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$, 视线分量的平均功率 $\Omega = E[|U_L|^2]$, U_L 为视轴分量, φ_A 和 φ_B 为视线分量和同轴分量各自的确定相位。利用 $F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma^{\text{FSO}}) = \int_0^{\gamma^{\text{FSO}}} f_{\gamma^{\text{FSO}}}(t) dt$ 对(3)式进行积分, 经过简单的代数运算, γ^{FSO} 的累计分布函数(CDF)可以表示为

$$F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma^{\text{FSO}}) = \frac{g^2 A}{16\pi} \sum_{k=1}^{\beta} c_k 2^{\alpha+k} G_{3,7}^{6,1} \left(\frac{B^2 \gamma^{\text{FSO}}}{16\chi^{\text{FSO}}} \left| \begin{matrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{matrix} \right. \right), \quad (5)$$

式中: $\kappa_1 = 1, \frac{1+g^2}{2}, \frac{2+g^2}{2}$; $\kappa_2 = \frac{g^2}{2}, \frac{g^2+1}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{k}{2}, \frac{k+1}{2}, 0$ 。值得注意的是, Málaga 分布统一了大部分已知的均匀且各向同性的湍流数学统计模型, 当参数设置为 ($\mu=0, \Omega'=1$) 和 ($\mu \neq 0, \Omega'=0$ 或 $\beta=1$) 时, 它们作为 Málaga 分布的特殊情况, 分别表示了 Gamma-Gamma 模型和 κ 模型^[8]。

2.2 RF 链路

在 RF 链路的发射端, 副载波调制信号 $m(t)$ 首先被向上转换为 60 GHz 毫米波的射频信号, 再被发送到 RF 信道中。在 RF 链路的接收端, RF 信号被向下转换且解调为原始信号。输出信号 y^{RF} ^[9] 为

$$y^{\text{RF}} = \sqrt{P^{\text{RF}}} h^{\text{RF}} m(t) + n_0, \quad (6)$$

式中: P^{RF} 为 RF 链路的发射功率; h^{RF} 为信道状态。

接收到的瞬时 SNR (γ^{RF}) 可以表示为

$$\gamma^{\text{RF}} = \frac{P^{\text{RF}} (h^{\text{RF}})^2}{\sigma_n^2} = \bar{\gamma}^{\text{RF}} \times (h^{\text{RF}})^2, \quad (7)$$

式中: $\bar{\gamma}^{\text{RF}}$ 为平均 SNR。在 RF 链路的 Nakagami- m 信道中, γ^{RF} 的 PDF^[10] 为

$$f_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma^{\text{RF}}) = \left(\frac{m}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \right)^m \frac{\gamma^{\text{RF} m-1}}{\Gamma(m)} G_{0,1}^{1,0} \left[\frac{m\gamma^{\text{RF}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \left| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right. \right], \quad (8)$$

式中: m 为 RF 链路的衰弱参数, $m \geq 0.5$ 。信噪比 γ^{RF} 的 CDF 可以通过积分获得, 表达式为

$$F_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma^{\text{RF}}) = \frac{1}{\Gamma(m)} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m\gamma^{\text{RF}}}{\bar{\gamma}^{\text{RF}}} \left| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \right. \right). \quad (9)$$

2.3 基于选择合并方案的混合 FSO/RF 系统

混合 FSO/RF 系统采用选择合并方案, 通过检测每条链路的电 SNR 并且选择具有最大 SNR 的信号来实现。因此, 选择合并器的输出信噪比 γ^{SC} ^[11] 可以表示为

$$\gamma^{\text{SC}} = \max(\gamma^{\text{FSO}}, \gamma^{\text{RF}}). \quad (10)$$

因此, 信噪比 γ^{SC} 的 CDF 可以表示为

$$F_{\gamma^{\text{SC}}}(\gamma) = \Pr[\max(\gamma^{\text{FSO}}, \gamma^{\text{RF}}) \leq \gamma] = \Pr(\gamma^{\text{FSO}} \leq \gamma, \gamma^{\text{RF}} \leq \gamma) = F_{\gamma^{\text{FSO}}}(\gamma) F_{\gamma^{\text{RF}}}(\gamma). \quad (11)$$

将(5)、(9)式代入(11)式, 并利用文献[12]中的公式(07.34.16.0003.01), 可得选择合并器的 CDF 为

$$F_{\gamma^{sc}}(\gamma) = \frac{g^2 A}{16\pi\Gamma(m)} \sum_{k=1}^{\beta} c_k 2^{a+k} G_{0,0:1,2;3,7}^{0,0:1,1;6,1} \left(- \left| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \right|_{\kappa_2} \left| \begin{matrix} m\gamma \\ \gamma^{RF} \end{matrix} \right|, \frac{B^2 \gamma}{16\chi^{FSO}} \right), \quad (12)$$

式中: $G_{\cdot;\cdot;\cdot}(\cdot)$ 为扩展广义双变量 Meijer G 函数 (EGBMGF)^[13]。

3 系统性能分析

3.1 平均误码率

对混合 FSO/RF 系统,二进制调制方案被用于任意一条 FSO 或 RF 链路中进行数据传输。平均误码率的闭合表达式^[14]可以表示为

$$P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \exp(-q\gamma) (\gamma)^{p-1} F_{\gamma^{sc}}(\gamma) d\gamma, \quad (13)$$

式中: p 和 q 为分别描述不同二进制调制方案的误码率参数,如表 1 所示。

表 1 不同二进制调制方案中的参数 p 和 q

Table 1 Parameter p and q in different binary modulation schemes

Binary modulation scheme	p	q
Coherent binary phase shift keying (CBPSK)	0.5	1
Differential binary phase shift keying (DBPSK)	1	1
Coherent binary frequency shift keying (CBFSK)	0.5	0.5
Non-coherent binary frequency shift keying (NBFSK)	1	0.5

将(12)式代入到(13)式中,并利用文献[14]中的(17)式进行简化计算,可得混合 FSO/RF 系统的平均误码率为

$$P_b = \frac{g^2 A}{32\pi\Gamma(p)\Gamma(m)} \sum_{k=1}^{\beta} c_k 2^{a+k} G_{0,0:1,1;6,1}^{1,0:1,1;6,1} \left(- \left| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \right|_{\kappa_2} \left| \begin{matrix} m \\ q\gamma^{RF} \end{matrix} \right|, \frac{B^2}{16q\chi^{FSO}} \right). \quad (14)$$

将(5)式代入(14)式中,并利用文献[15]中(7.813.1)可得单 FSO 链路的平均误码率为

$$P_b = \frac{g^2 A}{32\pi\Gamma(p)} \sum_{k=1}^{\beta} c_k 2^{a+k} G_{4,7}^{6,2} \left(\frac{B^2}{16q\chi^{FSO}} \left| \begin{matrix} 1-p, \kappa_1 \end{matrix} \right|_{\kappa_2} \right). \quad (15)$$

3.2 中断概率

中断概率是指输出 SNR 低于特定阈值 γ_{th} 时的概率。因此,本文系统的中断概率^[16]可以表示为

$$P_{out} = \Pr(\gamma^{sc} < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma^{sc}}(\gamma) d\gamma = F_{\gamma^{sc}}(\gamma_{th}). \quad (16)$$

将(12)式代入到(16)式中,可得混合 FSO/RF 系统的中断概率为

$$P_{out} = \frac{g^2 A}{16\pi\Gamma(m)} \sum_{k=1}^{\beta} c_k 2^{a+k} \times G_{0,0:1,1;6,1}^{0,0:1,1;6,1} \left(- \left| \begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \right|_{\kappa_2} \left| \begin{matrix} m\gamma_{th} \\ \gamma^{RF} \end{matrix} \right|, \frac{B^2 \gamma_{th}}{16\chi^{FSO}} \right). \quad (17)$$

4 系统仿真

从不同调制方案、不同湍流强度、不同衰弱参数及不同指向性误差等角度,在 Málaga 湍流信道和 Nakagami- m 衰弱信道下对混合 FSO/RF 系统的误码率和中断概率性能进行分析。当传输距离为 $L=1$ km 时,在弱湍流、中等湍流及强湍流条件下,相应 Rytov 指数 σ_R^2 分别为 0.7591、1.0458 及 2,则其 M 湍流模型参数 (α, β, ρ) 分别为 (5, 3, 0.25)、

(3, 2, 0.75) 及 (2, 1, 0.9), 其他参数 $\Omega = 1.3265$, $b_0 = 0.1079$, $\varphi_A - \varphi_B = \pi/2$ 。在系统仿真中,假设 FSO 和 RF 链路中每比特平均信噪比 SNR 是相等的,即 $\chi^{FSO} = \bar{\gamma}^{RF}$ 。

当 RF 信道衰弱参数 $m=2$ 、FSO 信道为强湍流、指向性误差参数 $g=1$ 时,图 1 为在不同 SIM 技

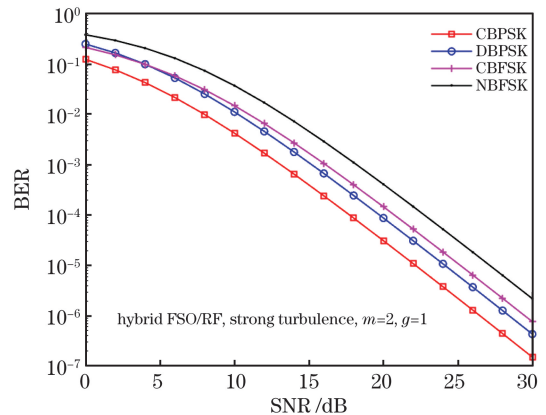


图 1 强湍流条件下,不同调制方案获得的混合 FSO/RF 系统平均 BER 性能

Fig. 1 Average BER performance of the hybrid FSO/RF system obtained by different modulation schemes under strong turbulence condition

术情况下,基于 IM/DD 方案的混合 FSO/RF 系统的平均 BER 与平均 SNR 之间的关系。由图 1 可知,与非相干调制技术(DBPSK 和 NBFSK)相比,相干调制技术(CBPSK 和 CBFSK)拥有更高的能量效率和更优良的误码率性能,这是因为相干调制技术可以在接收端处预知载波相位,从而可以有效地恢复原始信号。比如当平均 SNR 为 30 dB 时,CBPSK、DBPSK、CBFSK 及 NBFSK 技术的 BER 分别达 1.548×10^{-7} 、 4.431×10^{-7} 、 7.805×10^{-7} 及 2.226×10^{-6} 。图 1 表明,经过副载波相移键控调制后的信号误码率性能要优于副载波频移键控调制后的信号,并且 CBPSK 的误码率性能最好。

当 RF 信道衰弱参数 $m = 2$ 、指向性误差参数 $g = 1$ 、采用 CBPSK 调制时,图 2 为混合 FSO/RF 系统和单 FSO 系统在不同湍流强度条件下平均 BER 与平均 SNR 的关系。可知:混合系统的误码率性能显著优于单 FSO 系统的误码率性能;无论是混合系统还是单 FSO 系统,随着湍流强度的增加,BER 越大;混合 FSO/RF 系统能显著降低大气湍流效应对系统性能的影响。例如:对于单 FSO 系统,SNR 为 30 dB 时,强湍流与弱湍流条件下误码率之差约为 0.03;而对于混合 FSO/RF 系统,强湍流与弱湍流条件下的误码率之差为 8.479×10^{-8} 。

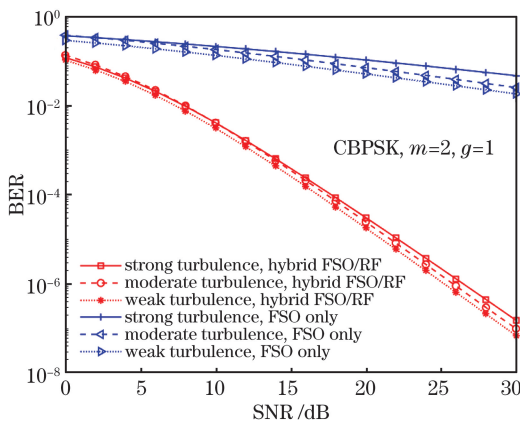


图 2 在不同湍流强度下,混合 FSO/RF 系统和单 FSO 系统的平均 BER 性能

Fig.2 Average BER performance of the hybrid FSO/RF system and FSO system under different turbulence conditions

当 FSO 信道为强湍流、采用 CBPSK 调制时,图 3 为混合 FSO/RF 系统在不同 RF 信道衰弱参数 m 和不同指向性误差参数 g 条件下平均 BER 与平均 SNR 的关系。由图 3 可以看出:RF 信道衰弱参数对混合系统的误码率性能影响较大,当平均 SNR 为 20 dB 且

$g = 1$ 时, $m = 2$ 的系统误码率为 3.138×10^{-5} ,而 $m = 6$ 的系统误码率为 2.191×10^{-9} ;指向性误差参数对混合系统的误码率性能影响较小,当平均 SNR 为 20 dB 且 $m = 6$ 时, $g = 1$ 的系统误码率为 2.191×10^{-9} ,而 $g = 4$ 的系统误码率为 1.282×10^{-9} 。

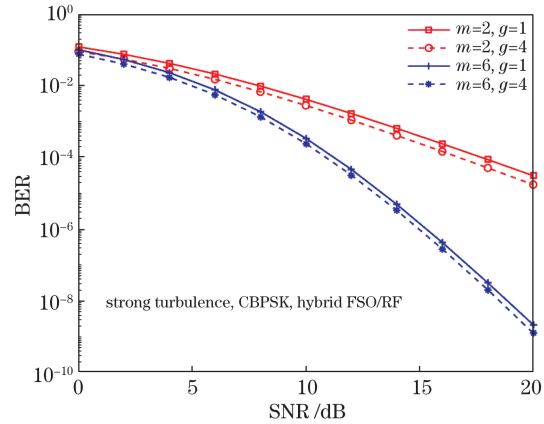


图 3 在强湍流下,不同 m 和 g 下混合 FSO/RF 系统的平均 BER 性能

Fig.3 Average BER performance of the hybrid FSO/RF system under strong turbulence condition with different values of m and g

当 RF 信道衰弱参数 $m = 2$ 且指向性误差参数 $g = 1$ 时,图 4 为混合 FSO/RF 系统在不同湍流强度和不同判决阈值 γ_{th} 条件下中断概率与平均 SNR 的关系。由图 4 可知:在相同的 FSO 和 RF 信道条件下,随着判决阈值 γ_{th} 的增大,系统中断概率也随之明显增加,当混合系统处于强湍流条件时, $\gamma_{th} = 10$ dB 时的系统在 SNR 为 30 dB 时中断概率为 1.46×10^{-6} ,而 $\gamma_{th} = 20$ dB 的系统中断概率为 2.345×10^{-5} ;

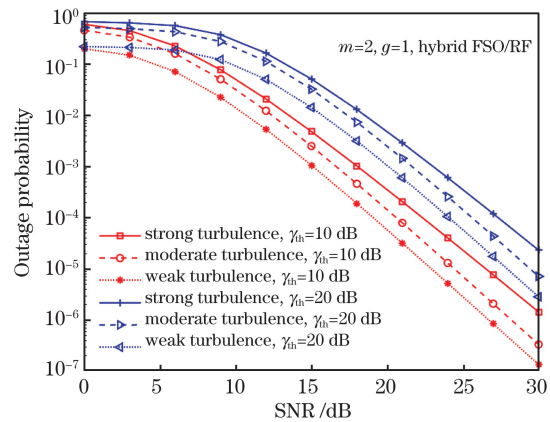


图 4 在不同湍流条件和判决阈值下,混合 FSO/RF 系统的中断概率性能

Fig.4 Outage probability performance of the hybrid FSO/RF system under different turbulence conditions and decision thresholds

在其他条件都相同的情况下,随着湍流强度的增加,系统的中断概率明显增加,当 $\gamma_{th} = 10$ dB 时,强湍流、中等湍流、弱湍流系统在 SNR 为 30 dB 时的中断概率分别为 1.46×10^{-6} 、 3.378×10^{-7} 、 1.377×10^{-7} 。

5 结 论

在包含指向性误差的 Málaga 湍流信道和 Nakagami- m 衰弱信道条件下,研究了采用选择合并方案的混合 FSO/RF 系统的误码率和中断概率指标,并推导出它们的闭合解。理论模拟了不同副载波调制技术(CBPSK、DBPSK、CBFSK、NBFSK)、大气湍流从弱到强变化、不同指向性误差、不同 RF 衰弱参数对混合 FSO/RF 系统和单 FSO 系统性能的影响。仿真结果表明:采用 CBPSK 技术的混合 FSO/RF 系统性能要明显优于采用其他三种调制技术的系统;混合 FSO/RF 系统性能要远远优于单 FSO 系统,显著降低了大气湍流效应对系统性能的影响,同时也在一定程度上抑制了指向性误差对系统的影响;混合 FSO/RF 系统性能对 RF 信道衰落参数的变化较为敏感。

参 考 文 献

- [1] Wu Y, Mei H P, Wei H L. Performance analysis of free-space optical communication system under joint channel conditions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050101.
吴琰, 梅海平, 魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050101.
- [2] Usman M, Yang H C, Alouini M S. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 7902713.
- [3] Touati A, Abdaoui A, Touati F, et al. On the effects of combined atmospheric fading and misalignment on the hybrid FSO/RF transmission [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(10): 715-725.
- [4] Shakir W M R. On performance analysis of hybrid FSO/RF systems [J]. IET Communications, 2019, 13(11): 1677-1684.
- [5] Odeyemi K O, Owolawi P A. Selection combining hybrid FSO/RF systems over generalized induced-fading channels [J]. Optics Communications, 2019, 433: 159-167.
- [6] Chatzidiamantis N D, Karagiannidis G K, Kriezis E E, et al. Diversity combining in hybrid RF/FSO systems with PSK modulation [C]//2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 5-9, 2011, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2011.
- [7] Song X G, Yang F, Cheng J L. Subcarrier intensity modulated optical wireless communications in atmospheric turbulence with pointing errors [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(4): 349-358.
- [8] Ansari I S, Yilmaz F, Alouini M S. Performance analysis of free-space optical links over Málaga (M) turbulence channels with pointing errors [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 91-102.
- [9] Shakir W M R. Performance analysis of the hybrid MMW RF/FSO transmission system [J]. Wireless Personal Communications, 2019, 109(4): 2199-2211.
- [10] Alathwary W A, Altubaishi E S. On the performance analysis of decode-and-forward multi-hop hybrid FSO/RF systems with hard-switching configuration [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-12.
- [11] Shakir W M R. Performance evaluation of a selection combining scheme for the hybrid FSO/RF system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 7901110.
- [12] Wolfram Research. Meijer G function [EB/OL]. [2020-05-19]. <http://functions.wolfram.com/HypergeometricFunctions/MeijerG/>.
- [13] Sharma B L, Abiodun R F A. Generating function for generalized function of two variables [J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 1974, 46(1): 69-72.
- [14] Ansari I S, Al-Ahmadi S, Yilmaz F, et al. A new formula for the BER of binary modulations with dual-branch selection over generalized-K composite fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(10): 2654-2658.
- [15] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Norms [M]//Table of Integrals, Series, and Products. Amsterdam: Elsevier, 1980: 1114-1125.
- [16] Castillo-Vázquez C, Boluda-Ruiz R, Castillo-Vázquez B, et al. Outage performance of DF relay-assisted FSO communications using time diversity [C]//2015 IEEE Photonics Conference (IPC), October 4-8, 2015, Reston, VA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 423-426.