

RF/MIMO-FSO 混合通信系统误码性能分析

徐建武,刘锡国,王 瑞,毛忠阳

(海军航空大学,山东 烟台 264001)

摘要:针对射频(RF)通信容量不高、保密性不强的问题,提出一种由 RF 系统和多发射多接收的自由空间光(MIMO-FSO)系统构成的 RF/MIMO-FSO 混合通信系统。在分析 RF 系统、MIMO-FSO 系统、单输入单输出(SISO)-FSO 系统和 RF/MIMO-FSO 混合通信系统模型的基础上,仿真对比了这 4 种系统的误码性能。结果表明:相比 RF 系统和 SISO-FSO 系统,RF/MIMO-FSO 混合通信系统的误码性能得到了显著提升,在采用相同调制方式下,比 SISO-FSO 系统平均提高 3 个数量级左右。

关键词:射频通信;无线激光通信;混合系统;多输入多输出;误码性能

中图分类号:TN914 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)06-0039-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Bit error performance analysis of
RF/MIMO-FSO hybrid communication system

XU Jianwu, LIU Xiguo, WANG Rui, MAO Zhongyang

(Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: For the problem of low communication capacity and low confidentiality of radio frequency(RF) communication, combined RF system and multiple input multiple output free-space optical (MIMO-FSO) system, this paper proposes the RF/MIMO-FSO hybrid communication system. Based on the analysis of RF system, MIMO-FSO system, single input single output (SISO)-FSO system and RF/MIMO-FSO hybrid communication system models, the bit error performance of the these four systems is compared through simulation. The result shows that compared with RF system and SISO-FSO system, the bit error performance of RF/MIMO-FSO hybrid communication system is significantly improved, it is about 3 orders of magnitude higher than SISO-FSO system on average under adopting the same modulation mode.

Key words: radio frequency communication, free space optical communication, hybrid system, multiple input multiple output, bit error performance

0 引言

射频/自由空间光(RF/FSO)混合通信系统(下文简称混合系统)可以充分利用 RF 通信和光通信的互补优势,已得到广泛的关注和研究^[1-2],但是,目前大多数对 RF/FSO 混合系统的研究都集中在考虑如何通过接收端采取合适的信号处理方式来提高系统通信容量,降低误码率和中断概率。为了在不降低传输速率

的情况下提高 FSO 系统可靠性,文献[3]分析了 RF/FSO 混合系统的性能。文献[4]分析了利用 RF 系统和 FSO 系统各自优点互补的特点,在接收端采用硬件切换的方式提高混合系统性能的方法。文献[5]在接收端同时接收 FSO 系统和 RF 系统的信息,数据处理上,采用不同的合并方式来改善系统性能。文献[6]提出了一种采用联合比特-交织编码调制方法的 RF/FSO 混合系统,改善了系统的鲁棒性,但是在发射端系统必须已知信道状态信息。文献[7]提出了一种考虑路径损耗、信道衰减和对准误差的 RF/FSO 混合系统,但是该模型中 FSO 系统和 RF 系统不能同时工作,需要根据信道环境不同进行硬切换。文献[8]提出了一种采用选择性合并方式的 RF/FSO 混合系统,可以避免频繁硬切换带来的性能恶化,得到了系统终端概率和平均误码率的

收稿日期:2021-07-05。

作者简介:徐建武(1982—),男,湖南益阳人,博士,讲师。主要研究方向是无线光通信中编码调制技术、MIMO 信号处理。参与了多项国家重大项目,且参与的项目在 2017 年获山东省科技进步奖一等奖。



封闭解,但是没有考虑指向误差的影响。文献[9]提出了一种采用自适应合并方式的 RF/FSO 混合系统,在信噪比大于 FSO 系统要求的门限值时,只有 FSO 系统工作;当接收信噪比达不到 FSO 系统门限时,接收端采用双支路最大比合并方式,这种设计改进了系统性能。文献[10]提出了双跳 RF/FSO 混合系统,并分析了混合系统的性能。文献[11]分析了 RF/FSO 混合系统在考虑对准误差,以及接收端采用选择性合并方式下系统的中断概率和误码性能,但是在 FSO 系统中,考虑的是单发射天线、单接收天线的情况。

综合上述文献,目前大多数对 RF/FSO 混合系统的研究都集中在考虑如何通过接收端采取合适的信号处理方式来提高系统通信容量,降低误码率和中断概率,且在混合系统中,FSO 系统都是单发射和单接收光学结构。本文在文献[11]的研究基础上,提出 RF/MIMO-FSO 混合系统,即采用多发射多接收(MIMO)的光学结构来改善 RF/FSO 混合系统的抗湍流能力,减小信道衰减的影响,进一步提升系统整体的差错性能。

1 RF/MIMO-FSO 混合系统模型

本文提出的 RF/MIMO-FSO 系统模型如图 1 所示。发射端采用 M 个激光器发射信息序列,接收端采用 N 个光电检测器进行光信号的接收,然后根据接收信号的信噪比大小来判决采用 RF 系统或者 FSO 系统。

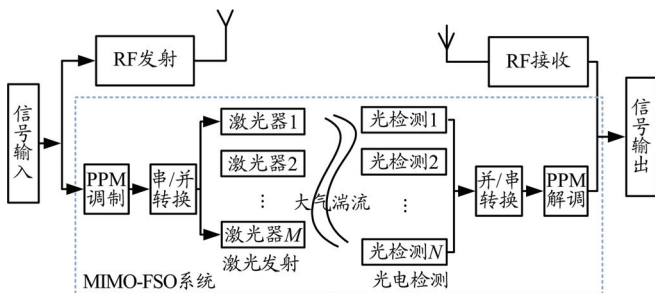


图 1 RF/MIMO-FSO 混合系统原理图

1.1 RF 系统

目前,RF 系统常用的信道衰落分布模型有瑞利分布、莱斯分布和 Nakagami- m 分布等,其中,瑞利分布和莱斯分布有时与实验数据不太吻合,所以实际应用较少,而 Nakagami- m 分布更接近实验数据因此被广泛采用。本文假设信道衰减服从 Nakagami- m 分布,发射端采用二进制相移键控(BPSK)调制方式,发射信号为 x ,则接收端接收信号强度为

$$y = \sqrt{h_l} h_n x + N_0 \quad (1)$$

其中, h_l 为传输路径损耗, h_n 为 Nakagami- m 信道衰

减, N_0 为高斯白噪声。根据文献[10], h_l 可以表示为

$$h_l = G_T + G_R - 20 \lg \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right) - (\alpha_0 - \alpha_r) D \quad (2)$$

其中, G_T 和 G_R 分别表示发射天线增益和接收天线增益, D 表示传输距离, λ 表示电磁波的波长, α_0 、 α_r 分别表示路径中氧气、雨吸收引起的衰减系数。那么,接收端信号的瞬时信噪比可表示为

$$u_{RF} = h_n^2 P_t E_s / N_0 \quad (3)$$

其中, P_t 和 E_s 分别表示发射功率和每个发射符号的能量。由于信道衰减服从 Nakagami- m 分布,则接收信噪比的概率密度分布函数(PDF)^[10]可表示为

$$f(u_{RF}) = \frac{\left(\frac{m}{\bar{u}_{RF}} \right)^m u_{RF}^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp \left(-\frac{m u_{RF}}{\bar{u}_{RF}} \right) \quad (4)$$

其中, $\bar{u}_{RF} = P_t E_s / N_0$ 表示平均信噪比, $\Gamma(\cdot)$ 表示伽玛函数, m 表示衰落参数。因此,可推导出接收信号的概率分布函数(CDF)为

$$F(u_{RF}) = \frac{1}{\Gamma(m)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m u_{RF}}{\bar{u}_{RF}} \right] \quad (5)$$

其中, G 表示 Meijer- G 函数。假设接收信号信噪比门限值为 u_{th}^{RF} ,若 RF 带宽为 B ,则 RF 系统的平均误码率可表示为

$$P_e^{RF}(u_{th}^{RF}) = \int_{u_{th}^{RF}}^{\infty} \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{B u_{RF}}) \times f(u_{RF}) du_{RF} = \frac{1}{2} \frac{\operatorname{erfc}(\sqrt{u_{th}^{RF} B})}{\Gamma(m)} \Gamma \left[m, \frac{u_{th}^{RF}}{\bar{u}_{RF}} \right] - \frac{B}{2\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{m-1} \frac{\Gamma \left[n + \frac{1}{2}, u_{th}^{RF} \left(B^2 + \frac{m}{u_{RF}} \right) \right]}{\Gamma(n+1) \left(B^2 + \frac{m}{u_{RF}} \right)^{n+1/2}} \left(\frac{m}{\bar{u}_{RF}} \right)^n \quad (6)$$

其中, n 表示从 $0 \sim m-1$ 的整数。

1.2 MIMO-FSO 系统

MIMO-FSO 光通信系统采用单脉冲位置调制(L-PPM)方式和最大似然解调方式,系统精确同步且无码间干扰;接收机已知信道状态信息,信道分布模型服从 Gamma-Gamma 分布,且分布参数相同。利用条件概率函数的相关计算方法,得到其平均误码率可以表示为

$$P_{MIMO}(u_{ev}) = \left(\int_0^{\infty} T_{x_{MN}}(x_{MN}) \times P(u_{ev} | x_{MN}) dx_{MN} \right)^{MN} \quad (7)$$

其中, u_{ev} 表示光电检测后电信号的平均信噪比, M 和 N 分别表示发射和接收天线的数目, x_{MN} 表示第 M 个发射天线到第 N 个接收天线的信号值, $P(u_{ev} | x_{MN})$ 表示

表示第 M 个发射天线和第 N 个接收天线之间传输路径的平均误码率, $T_{x_{MN}}(x_{MN})$ 为 x 的联合概率密度函数。

若其它条件不变, 各子信道也都服从独立同分布, 但是分布参数不同, 此时 MIMO-PPM 系统的平均误码率 $P_{\text{MIMO}}(u_{\text{ev}})$ 可以表示为

$$P_{\text{MIMO}}(u_{\text{ev}}) = \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^N \int_0^{\infty} \frac{2 - \text{erfc}(c_{ij}) + L \times \text{erfc}(h_{ij})}{2(L+1)} \times \frac{2(\alpha_{ij}\beta_{ij})^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}}}{\Gamma(\alpha_{ij})\Gamma(\beta_{ij})} y^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}-1} \times K_{\alpha_i-\beta_j}(2\sqrt{\alpha_{ij}\beta_{ij}y_{ij}}) dy_{ij} \quad (8)$$

其中, α_{ij} 和 β_{ij} 分别为闪烁指数强度的大尺度和小尺度参数, $c_{ij} = \ln(L) \sqrt{\frac{MNy_{ij}}{4u_{\text{ev}}}} - \sqrt{\frac{u_{\text{ev}}}{4MNy_{ij}}}$, $h_{ij} = \ln(L) \times \sqrt{\frac{MNy_{ij}}{4u_{\text{ev}}}} + \sqrt{\frac{u_{\text{ev}}}{4MNy_{ij}}}$, i 和 j 分别表示从 $1 \sim M$ 和 $1 \sim N$ 的整数, $K_{\alpha_i-\beta_j}$ 表示第二类修正贝塞尔函数, y_{ij} 表示第 i 个发射天线和第 j 个接收天线之间的接收信号值。

本文用单输入单输 (SISO)-FSO 系统来对比 MIMO-PPM 系统的性能, 在进行仿真分析时, 二者满足以下条件:

① MIMO-PPM 系统多个激光器的总发射功率和 SISO-PPM 系统单个激光器的发射功率相等;

② 通过设置仿真参数, 使得 SISO-PPM 系统单个光学接收器孔径尺寸的大小与 MIMO-PPM 系统多个接收光学器孔径尺寸的总面积相等。

其它条件设置同式(8), 则 SISO-FSO 系统的平均误码率可以表示为

$$P_{\text{SISO}}(u_{\text{ev}}) = \int_0^{\infty} \frac{2 - \text{erfc}(c) + L \times \text{erfc}(g)}{2(L+1)} \times \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta x}) dx \quad (9)$$

其中, $c = \ln(L) \sqrt{\frac{x}{4u_{\text{ev}}}} - \sqrt{\frac{u_{\text{ev}}}{4x}}$, $g = \ln(L) \sqrt{\frac{x}{4u_{\text{ev}}}} + \sqrt{\frac{u_{\text{ev}}}{4x}}$ 。

1.3 RF/MIMO-FSO 混合系统

RF/MIMO-FSO 混合系统接收端采用选择性合并方式, 即对 RF 系统和 MIMO-FSO 系统的接收信噪比进行比较, 取较大的信噪比作为接收判决依据。

设判决输出的信噪比为 u_{sc} , 则 $u_{\text{sc}} = \max(u_{\text{RF}}, u_{\text{ev}})$, 而接收判决信号的 CDF 可表示为

$$F(u_{\text{sc}}) = F(u_{\text{RF}}) \times F(u_{\text{ev}}) =$$

$$\frac{1}{\Gamma(m)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{1}{m,0} \left| \frac{mu_{\text{sc}}}{u_{\text{sc}}} \right. \right] \times \int_0^{u_{\text{sc}}} \prod_{i=1}^M \prod_{j=1}^N \frac{2(\alpha_{ij}\beta_{ij})^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}}}{\Gamma(\alpha_{ij})\Gamma(\beta_{ij})} \left(\frac{u_{\text{sc}}}{u_{\text{sc}}} \right)^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}-1} \times K_{\alpha_i-\beta_j} \left(2\sqrt{\alpha_{ij}\beta_{ij} \left(\frac{u_{\text{sc}}}{u_{\text{sc}}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right) du_{\text{sc}} \quad (10)$$

由参考文献[11]可知, 混合系统的误码率可表示为

$$P_e = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^{\infty} \exp(-qu_{\text{sc}}) u_{\text{sc}}^{p-1} F(u_{\text{sc}}) du_{\text{sc}} \quad (11)$$

当 RF 系统采用 BPSK 调制时, 式(11)中, $p=1/2$, $q=1$, 设一个中间积分变量 u , 则系统误码率可简化为

$$P_e = \frac{1}{2\Gamma(1/2)} \int_0^{\infty} \exp(-u_{\text{sc}}) u_{\text{sc}}^{-1/2} F(u_{\text{sc}}) du_{\text{sc}} = \frac{1}{2\Gamma(1/2)} \int_0^{\infty} \exp(-u_{\text{sc}}) u_{\text{sc}}^{-1/2} \frac{1}{\Gamma(m)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{1}{m,0} \left| \frac{mu_{\text{sc}}}{u_{\text{sc}}} \right. \right] \times \int_0^{u_{\text{sc}}} \prod_{m=1}^M \prod_{n=1}^N \frac{2(\alpha_{ij}\beta_{ij})^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}}}{\Gamma(\alpha_{ij})\Gamma(\beta_{ij})} \left(\frac{u}{u_{\text{sc}}} \right)^{\frac{\alpha_i+\beta_j}{2}-1} \times K_{\alpha_i-\beta_j} \left(2\sqrt{\alpha_{ij}\beta_{ij} \left(\frac{u}{u_{\text{sc}}} \right)^{\frac{1}{2}}} \right) du du_{\text{sc}} \quad (12)$$

2 误码性能仿真分析

根据 RF/MIMO-FSO 混合系统信道模型, 本文对推导出的误码性能进行仿真分析, 具体情况如下: 首先, 对 RF 系统在不同接收机信噪比门限值下的误码性能进行分析; 然后, 仿真分析了不同调制参数和不同收发天线数目时 MIMO-FSO 系统的误码性能; 最后, 对 RF/MIMO-FSO 混合系统的总误码性能进行仿真分析。

2.1 RF 系统误码性能

RF 系统的仿真条件如下: Nakagami- m 衰落参数 $m=2$, 系统 RF 带宽 $B=250$ MHz, 传输距离 D 为 1 km, G_T 和 G_R 均为 43 dBi, 噪声功率谱密度为 -114 dBm/MHz, RF 载波频率为 50 GHz, 数据传输速率为 1 Gb/s, 接收机信噪比门限值分别为 3 dB、4 dB 和 5 dB。

当接收信号的信噪比变化范围为 5~30 dB 时, 仿真得到的 RF 系统的误码性能如图 2 所示。可以看出, 单纯采用 RF 传输, 系统的误码性能整体较差; 随着信噪比门限值的提高, 接收机误码率有所降低。但是, 这是要求所有接收信号信噪比都高于信噪比门限值的情况下得到的, 需要系统付出额外的代价, 比如提高发射功率。

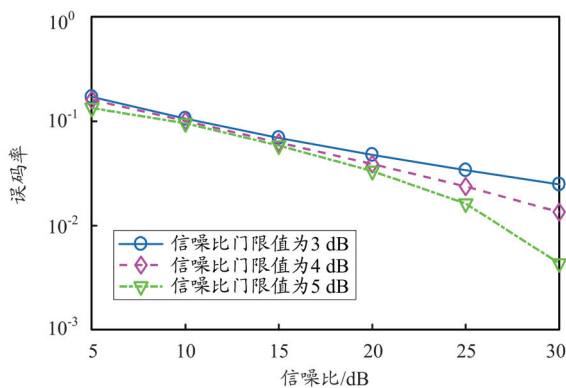


图2 RF系统误码性能

2.2 MIMO-FSO 系统误码性能

MIMO-FSO 系统的仿真条件设置如下: 光波长为 1550 nm, 发射和接收光学孔径均为 16 cm, 光/电转换效率为 1, 数据传输速率为 1 Gb/s, PPM 调制阶数 L 分别为 3、5 和 7, 发射接收天线数目均为 2, 信道分布模型服从 Gamma-Gamma 分布, 大小尺度参数值如表 1 所示。将表 1 的数据代入式(8)中, 计算得到不同 PPM 调制阶数时 MIMO-FSO 系统的误码性能如图 3 所示。可以看出, MIMO-FSO 系统的误码性能整体上比 RF 好很多, 且随着 PPM 调制阶数的增加, 系统误码性能改善明显, 这是因为编码增益导致系统误码率下降。但是, 调制阶数越高, 系统设计的复杂度、资源消耗也会增加。

PPM 调制阶数不变, 改变发射和接收天线数目,

表 1 湍流大小尺度参数值

参数	参数值	参数	参数值
α_1, β_1	$\alpha_1=1.5$	α_3, β_3	$\alpha_3=3.5$
	$\beta_1=1.2$		$\beta_3=3.2$
α_2, β_2	$\alpha_2=2.5$	α_4, β_4	$\alpha_4=3.8$
	$\beta_2=2.0$		$\beta_4=3.4$

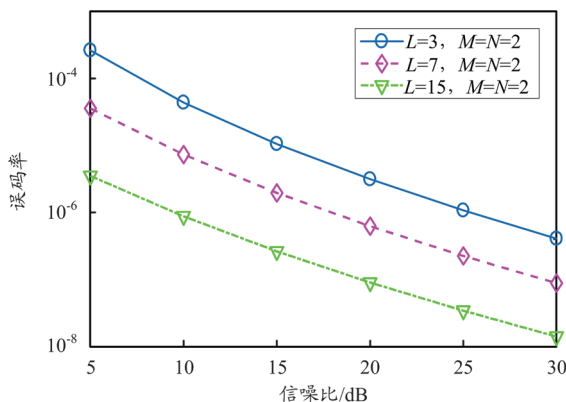


图3 不同调制阶数下 MIMO-FSO 系统误码性能

其它仿真参数设置不变, 得到的 MIMO-FSO 系统误码性能如图 4 所示。可以看出, 当 $M=N=1$ 时 (此时为 SISO-FSO 系统), 误码性能比较差, 随着发射和接收天线数目增加 (此时为 MIMO-FSO 系统), 误码性能改善十分明显。

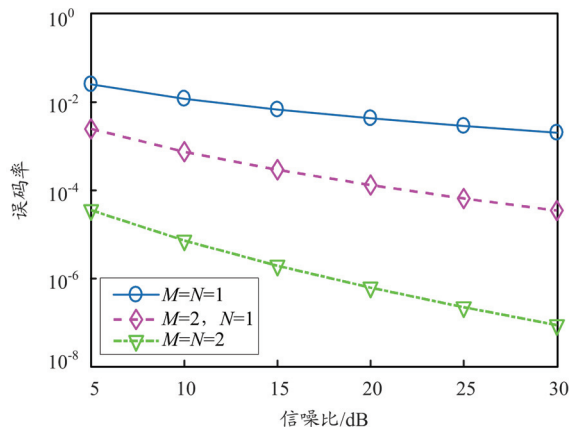


图4 不同收发天线数目下 MIMO-FSO 系统误码性能

2.3 RF/MIMO-FSO 混合系统误码性能

RF 系统、SISO-FSO 系统、MIMO-FSO 系统和 RF/MIMO-FSO 混合系统的误码性能如图 5 所示。其中, 接收机信噪比门限值和 PPM 调制阶数分别固定为 5 dB 和 7, 只改变发射和接收天线数目, 其它仿真参数设置不变。

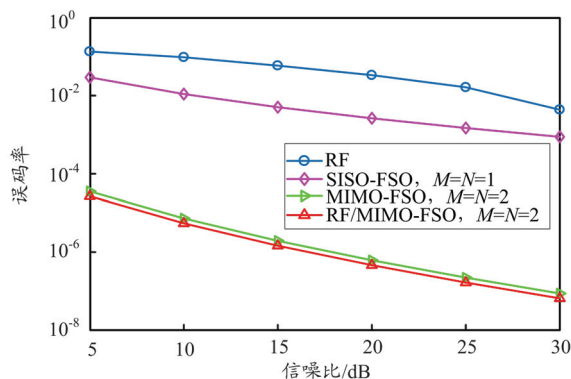


图5 RF系统和 MIMO-FSO 系统误码性能对比

从图 5 可以看出, FSO 系统的误码性能要优于 RF 系统, 其中, SISO-FSO 系统与 RF 系统误码性能接近, 采用 MIMO 结构后 FSO 系统误码性能得到显著改善。此外, 与 MIMO-FSO 系统相比, 虽然 RF/MIMO-FSO 混合系统的误码性能改善力度并不大, 但采用混合系统有 2 方面优势:

① RF/MIMO-FSO 混合系统中的 RF 系统可实现快速连通, 而 MIMO-FSO 系统则需要收发天线对准,

因此在收发端相距较远时,通过RF系统可快速传输双方精确位置和天线方位,有利于实现FSO系统的快速对准。

②在强降雨、强雾霾等极端天气情况下,MIMO-FSO系统可能直接处于中断状态,无法使用,而RF/MIMO-FSO混合系统中的RF系统可作为备份,使混合系统处于连续稳定工作状态。

3 结束语

本文提出了RF/MIMO-FSO混合系统,接收端采用选择性合并方式,改进了系统性能;通过MIMO结构来改善RF/FSO混合系统的抗湍流能力,减小信道衰减的影响,进一步提升系统整体的误码性能。仿真结果表明:采用MIMO结构后,RF/MIMO-FSO混合系统的误码性能得到了显著提升,在相同调制方式下,比SISO-FSO系统误码性能平均提高3个数量级左右。本文的研究可为RF/MIMO-FSO混合系统的设计和装备研制提供参考依据。

参考文献:

- [1] LEI H, DAI Z, ANSARI I S, et al. On secrecy performance of mixed RF-FSO systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1-14.
- [2] 王雪,王惠琴,曹明华. 相关无线光MIMO系统的信道容量[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 663-668.
- [3] EL-MAIEK A A, SALHAB A, ZUMMO S, et al. Effect of RF interference on the security-reliability trade-off analysis of multiuser mixed RF/FSO relay networks with power allocation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(9): 1490-1505.
- [4] USMAN M, YANGN H C, ALOUINI M S. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1-13.
- [5] EL-MALEK A H A, SALHAB A M, ZUMMO S A, et al. Security-reliability trade-off analysis for multiuser SIMO mixed RF/FSO relay networks with opportunistic user scheduling [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(9): 5904-5918.
- [6] HE B, SCHOBERN R. Bit-interleaved coded modulation for hybrid RF/FSO systems [J]. IEEE Transactions Communications, 2009, 57(12): 3753-3763.
- [7] TOUATI A, ABD AOUI A, et al. On the effects of combined atmospheric fading and misalignment on the hybrid FSO/RF transmission[J]. IEEE/OSA Journal Opt. Communications Networking, 2016, 8(10): 715-725.
- [8] SHAKIR W M R. Performance evaluation of a selection combining scheme for the hybrid RF/FSO systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 10(99): 790-801.
- [9] TAMER R, HONG-CHUAN Y, MOHAMED-SLIM A, et al. Outage analysis of practical FSO/RF hybrid system with adaptive combining [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 450-462.
- [10] ZEDINI E, SOURY H, ALOUINI M S. On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/RF systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3679-3689.
- [11] LIANG H, LI Y, MIAO M, et al. Analysis of selection combining scheme for hybrid FSO/RF transmission considering misalignment [J]. Optics Communications, 2019, 435: 399-404.