

基于马尔科夫模型的双站激光微波混合链路性能分析

邵军虎^{1,2}, 杜旭晓^{1*}, 庞 健¹, 史魏征¹

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安市无线光通信与网络研究重点实验室, 陕西西安 710048;
2. 华侨大学厦门市移动多媒体通信重点实验室, 福建厦门 361021)

摘 要: 针对气象变化对自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信链路和毫米波射频(Radio Frequency, RF)通信链路可用率的影响问题, 采用马尔科夫建模与稳态概率求解计算方法, 分析不同天气条件下FSO/RF混合链路的双接收站分集与中断概率性能. 基于FSO链路和RF链路的信道模型, 采用有限状态马尔科夫链(Finite State Markov Chain, FSMC)分别对单双站FSO/RF混合链路的切换选择进行建模, 推导得出不同参数和天气情况下系统稳态的中断概率表达式. 数值计算结果表明, 当中断概率达到 10^{-6} , 雨雾天气链路距离为1~7 km时, 双站FSO/RF混合链路相比单站可获得4~25 dB的增益.

关键词: FSO/RF混合链路; 多站分集; 马尔科夫模型; 中断概率; 误码率

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No.12104362); 陕西省重点研发计划一般项目(No.2020GY-036); 陕西省重点产业创新链项目(No.2017ZDCXL-GY-05-03); 厦门市移动多媒体通信重点实验室(华侨大学)开放基金(No.HQUCOM17-02)

中图分类号: TN929.12; TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)02-0468-09

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220738

Performance Analysis of Dual Ground Station Laser-Microwave Hybrid Links Based on Markov Model

SHAO Jun-hu^{1,2}, DU Xu-xiao^{1*}, PANG Jian¹, SHI Wei-zheng¹

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
2. Xiamen Key Laboratory of Mobile Multimedia Communications, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: Aiming at the system availability problem of free space optical (FSO) link and millimeter wave radio frequency (RF) link under various meteorological conditions, multiple ground station diversity and system outage probability performance were investigated by using Markov model steady-state probability equilibrium method. Based on the channel models of FSO link and RF link, hybrid link selection finite state Markov chain (FSMC) was established for single and dual station scheme respectively. Then their outage probability expressions were derived and calculated under different system parameters and weather conditions. Numerical results show that at outage probability 10^{-6} , with link distance 1~7 km under rainy and foggy weather conditions, the dual ground station FSO/RF hybrid link can achieve 4~25 dB gain compared to single station case.

Key words: FSO/RF hybrid link; multiple ground station diversity; Markov model; outage probability; bit error rate

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.12104362); General Projects of Shaanxi Province's Key Research and Development Plan (No.2020GY-036); Shaanxi Province Key Industry Innovation Chain Project (No.2017ZDCXL-GY-05-03); Xiamen Mobile Multimedia Communication Key Laboratory (Overseas Chinese University) Open Funddation (No.HQUCOM17-02)

1 引言

自由空间光通信(Free Space Optical, FSO)是指以光波为载体,在真空或大气中进行视距信息传输的通信技术,具有高数据速率、免频谱许可、较强的方向性与安全性等优点,在灾后应急通信、星地卫星通信等领域,具有广阔的应用前景^[1].然而,FSO通信对天气非常敏感,它的可靠性易受大气吸收、散射和湍流等气象变化的制约,尤其是云、雾和雨对FSO链路传输质量的影响较大^[2].与FSO链路相比,传统射频通信(Radio Frequency, RF)采用微波射频链路进行信息传输,其在雾天具有较好的性能,而在雨雪天气中的性能有所下降^[3].因此,二者优势的互补结合,采用FSO/RF混合链路的异构组网通信方式,可以显著提高整体系统的数据速率和可靠性^[4,5].

2005年,Akbulut等人^[6]对FSO/RF混合通信链路进行实验,经过长达两年的观测,发现暴风雪和雾天对FSO通信可用性影响最大.2006年,Jia等人^[7]研究发现:在FSO链路中,误码率随着雾中能见度的降低而急剧增加;而在RF链路中,误码率随着降雨率的增大而增加.针对如何充分利用FSO/RF混合链路资源,提升不同气象条件下的系统性能,近年来国内外学者进行了广泛研究.恶劣天气对FSO的影响可以通过RF备用链路来应对;当FSO链路可用时,备用链路的冗余问题可以通过有效切换来解决,提高双链路资源的利用率,同时保持整体系统的可用性^[8].2009年,Nadeem等人^[9]对天气因素下的切换问题进行了分析,仿真结果表明,在保持冗余链路可用性方面,备份链路的平均使用率为14.79%,这意味着切换可以通过避免超过85%的备用链路传输来提供相同的可用性.2014年,Kazemi等人^[10]利用有限状态马尔科夫链(Finite State Markov Chain, FSMC)模拟了FSO/RF混合链路软切换的过程,分析了不同天气情况下混合链路的的中断性能,结果表明,使用FSMC可以有效提升FSO/RF混合链路的性能.2019年,Shakir等人^[11]推导了在大气湍流、雾和多径衰落信道下FSO/RF混合链路的误码率表达式,对比分析了采用不同调制方案时FSO/RF混合链路的误码率性能.

雨、雾、云层等气象条件是影响无线光通信可用性的重要因素.在星地间激光通信CCSDS标准的红皮书中,多站分集技术是用于对抗恶劣气候、保障链路盈余、实现链路全天候可用的有效手段之一.然而在FSO/RF混合链路方面,采用多站分集技术所能带来增益的量化计算,仍是一个值得研究的问题.

本文针对不同天气条件和距离下的FSO/RF混合通信链路,通过FSMC过程对其信道和切换方式进行建模,推导得到了双链路混合的误码率和中断概率表达式.在FSMC模型的基础上,分别对单/双站FSO/RF混合链路的中断性能进行了不同条件下的计算和分析.

结果表明,相比单站FSO/RF混合链路,双站FSO/RF混合链路的性能更好,通信更可靠.

2 链路模型

对于FSO/RF混合系统的应用场景,通常以FSO链路作为主链路,RF链路为备用或并行辅助链路,其双链路使用有硬切换和软切换两种方式.硬切换中,在某一时刻只有一个链路是可用的.而软切换中,FSO和RF两条链路采用同时传输的并行工作方式.软切换FSO/RF混合系统的工作原理如图1所示.发射端根据接收端反馈的信道状态信息(Channel State Information, CSI)将码元序列按一定比例分成两部分,分别经FSO链路和RF链路的调制器调制后发送.接收端对来自FSO信道和RF信道的接收信号进行解调,将解调后的信息送给信道译码器,进行译码判决输出.

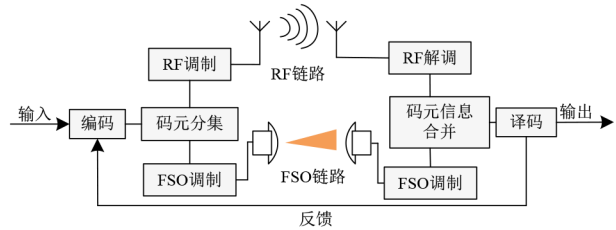


图1 软切换FSO/RF混合系统的工作原理图

2.1 FSO链路

FSO链路采用副载波相移键控(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)调制方式,接收信号 $r_1(k) = \eta P_1 h_{\text{FSO}} g_1 x_1(k_1) + n_1(k_1)$.这里, $P_1, \eta, x_1(k_1)$ 分别表示FSO链路的发射功率、光电探测器响应度以及输入调制信号; $n_1(k_1)$ 是高斯噪声分量, $E\{n_1(k_1)n_1^*(k_1)\} = \sigma_n^2$; g_1 和 h_{FSO} 分别是FSO链路的路径损耗以及湍流引起的衰落系数, $E\{h_{\text{FSO}}\} = 1$;假定发射机和接收机完全对准,根据朗伯-比尔定律, $g_1 = \exp(-\alpha_1 L)$,这里 α_1 表示与天气相关的衰减系数(单位为dB/km), L 是链路距离.

雨天条件下,FSO链路相对于降雨率 $R(\text{mm/h})$ 的具体衰减^[12]为 $\alpha_{1,\text{rain}} = 1.076R^{0.67}$.雾天条件下,FSO链路的衰减^[13]为 $\alpha_{1,\text{fog}} = \frac{3.91}{V(\text{km})} (\lambda/\lambda_0)^{-q}$.这里, $V(\text{km})$ 表示能见度范围, λ 表示波长, $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 表示能见度范围参考, q 是散射尺寸分布系数.在Kim模型中, q 值可以表示为

$$q = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \text{ km} \\ 1.3, & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34, & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5, & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0, & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

对于FSO链路,假定衰落系数 h_{FSO} 服从Gamma-

Gamma分布, 瞬时信噪比 $\gamma_{\text{FSO}} = \bar{\gamma}_{\text{FSO}} h_{\text{FSO}}^2$, 其中, $\bar{\gamma}_{\text{FSO}}$ 是平均电信噪比:

$$\bar{\gamma}_{\text{FSO}} = \frac{\eta^2 P_1^2 g_1^2}{\sigma_{n_1}^2} \quad (2)$$

信噪比 γ_{FSO} 的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 为

$$f_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{FSO}}) = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\bar{\gamma}_{\text{FSO}}^{\frac{\alpha+\beta}{4}}} \times \gamma_{\text{FSO}}^{\frac{\alpha+\beta}{4}-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \right) \quad (3)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数, $K_\nu(\cdot)$ 是第二类 ν 阶修正贝塞尔函数, α 和 β 表示与大气条件有关的光功率波动^[14]. 通过 Meijer'G 函数表示贝塞尔函数, 可将式(3)表示为

$$f_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{FSO}}) = \frac{\gamma_{\text{FSO}}^{-1}}{2\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{0.2}^{2.0} \left(\alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \middle| \alpha, \beta \right) \quad (4)$$

对式(4)进行积分, 并进行一些简单的代数运算, 可得信噪比 γ_{FSO} 的累积分布函数 (Cumulative Density Function, CDF) 表达式为

$$F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{FSO}}) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1.3}^{2.1} \left[\alpha\beta \sqrt{\frac{\gamma_{\text{FSO}}}{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \middle| \alpha, \beta, 0 \right] \quad (5)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 为 Meijer'G 函数.

2.2 RF 链路

RF 链路接收信号 $r_2(k) = \sqrt{P_2} h_{\text{RF}} x_2(k_2) + n_2(k_2)$, 这里 $x_2(k_2)$, P_2 , $n_2(k_2)$ 分别表示输入信号、发射功率以及高斯噪声分量, $E\{n_2(k_2)n_2^*(k_2)\} = \sigma_{n_2}^2$; h_{RF} 表示 RF 信

道系数, 可以分解为 $h_{\text{RF}} = \sqrt{h_{g_2} h_{f_2} h_{g_2}}$ 和 h_{f_2} 分别表示路径损耗和衰落系数, $E\{h_{f_2}^2\} = 1$, $h_{g_2} = G_t + G_r - 20 \times \log_{10} \left(\frac{4\pi L}{\lambda_2} \right) - \alpha_{2,\text{oxy}} L - \alpha_{2,\text{rain}} L$, 这里 G_t 和 G_r 分别表示发射和接收天线增益; λ_2 是 RF 链路的波长; $\alpha_{2,\text{oxy}}$ 和 $\alpha_{2,\text{rain}}$ 分别是氧气吸收和雨水引起的衰减. 雨的衰减系数采用 ITU-R 推荐的模型 $\alpha_{2,\text{rain}} = kR^\alpha$. 噪声方差 $\sigma_{n_2}^2 = 10 \log_{10}(B) + N_0 + N_F$, B , N_0 和 N_F 分别表示 RF 链路带宽、噪声功率谱密度和接收机的噪声系数.

对于 RF 链路, 假定衰落系数 h_{f_2} 服从莱斯 (Ricean) 分布, 瞬时信噪比 $\gamma_{\text{RF}} = \bar{\gamma}_{\text{RF}} h_{f_2}^2$, 平均信噪比 $\bar{\gamma}_{\text{RF}} = \frac{P_2 h_{g_2}}{\sigma_{n_2}^2}$.

信噪比 γ_{RF} 的 PDF 表达式为

$$f_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma_{\text{RF}}) = \frac{K+1}{\bar{\gamma}_{\text{RF}}} \exp\left(- (K+1) \frac{\gamma_{\text{RF}}}{\bar{\gamma}_{\text{RF}}} - K\right) \times I_0 \left(2\sqrt{K(K+1)} \frac{\gamma_{\text{RF}}}{\bar{\gamma}_{\text{RF}}} \right) \quad (6)$$

其中, K 是 Ricean 因子, $I_0(\cdot)$ 表示的是第一类零阶修正贝塞尔函数. 其 CDF 表达式为

$$F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma_{\text{RF}}) = 1 - Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\bar{\gamma}_{\text{RF}}} \gamma_{\text{RF}}} \right) \quad (7)$$

其中, $Q_1(x, y) = \int_y^\infty t \exp\left[-(t^2 + x^2)/2\right] I_0(xt) dt$ 是一阶 Marcum Q 函数.

与现有 FSO/RF 混合链路研究中采用的参数相一致^[15,16], 本文选定 FSO 和 RF 信道模型各参数的具体值如表 1 中所示, 不同天气条件对 FSO 链路和 RF 链路衰减的参数如表 2 所示.

表 1 FSO/RF 混合链路相关参数

FSO 子链路			RF 子链路		
参数	符号	值	参数	符号	值
波长	λ_1	1 550 nm	载波频率	f_c	60 GHz
输出功率	P_1	40 mW	发送功率	P_2	10 mW
接收机直径	D	20 cm	发射天线增益	G_t	44 dBi
发散角	θ	10 mrad	接收天线增益	G_r	44 dBi
光电探测器响应度	η	0.5 A/W	衰减	α_{oxy}	15.1 dB/km
噪声方差	$\sigma_{n_1}^2$	10^{-14}	Ricean 因子	K	6 dB
			带宽	B	250 MHz
			噪声功率谱密度	N_0	-114 dBm/MHz
			接收机噪声系数	N_F	5 dB

2.3 FSMC 模型

当信噪比高于所设定的阈值信噪比, 即 $\gamma_{\text{FSO}} > \gamma_{\text{th}}$ 时, FSO 链路可用; 同样, 当 $\gamma_{\text{RF}} > \gamma_{\text{th}}$ 时, RF 链路可用; 当

链路的信噪比低于其相应的阈值时, 链路不可用. 在最坏的情况下, 当两个链路的噪声太大时, 信噪比变得非常低. 当信噪比低于阈值时, FSO/RF 混合链路中断.

表 2 与天气有关的变量

天气	降雨速率	$C_n^2 \times 10^{-14} /$ ($m^{-2/3}$)	$\alpha_1 /$ (dB/km)	$\alpha_2 /$ (dB/km)
晴天	—	5.0	0.43	0
薄雾	—	1.7	3.34	0
轻雾	—	0.3	16.67	0
中雾	—	0.2	35.38	0
小雨	2.5 mm/h	0.6	1.98	1.50
中雨	12.5 mm/h	0.5	5.84	5.69
暴雨	25.0 mm/h	0.4	9.29	10.09

在软切换系统中,对单站 FSO/RF 混合链路定义其状态为 $X_n \in \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ 的四态马尔科夫模型,其中 S_0 表示 FSO 链路和 RF 链路都中断, S_1 表示只有 FSO 链路可用, S_2 表示只有 RF 链路可用, S_3 表示 FSO 链路和 RF 链路都可用.

将单站 FSO/RF 混合链路 4 种状态的稳态概率由 $\pi_i (i \in \{0, 1, 2, 3\})$ 表示. 由于 γ_{FSO} 和 γ_{RF} 是统计独立的, 因此, 其稳态概率表达式为

$$\begin{aligned}
 \pi_0 &= \Pr \{ \gamma_{FSO} < \gamma_{th1}, \gamma_{RF} < \gamma_{th2} \} \\
 &= F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th1}) \times F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th2}) \\
 \pi_1 &= \Pr \{ \gamma_{FSO} > \gamma_{th1}, \gamma_{RF} < \gamma_{th2} \} \\
 &= (1 - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th1})) \times F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th2}) \\
 \pi_2 &= \Pr \{ \gamma_{FSO} < \gamma_{th1}, \gamma_{RF} > \gamma_{th2} \} \\
 &= F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th1}) \times (1 - F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th2})) \\
 \pi_3 &= \Pr \{ \gamma_{FSO} > \gamma_{th1}, \gamma_{RF} > \gamma_{th2} \} \\
 &= (1 - F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th1})) \times (1 - F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th2}))
 \end{aligned} \tag{8}$$

其中, $F_{\gamma_{FSO}}(\gamma_{th1})$ 和 $F_{\gamma_{RF}}(\gamma_{th2})$ 分别由式(5)和式(7)给出.

对于双站 FSO/RF 混合链路, 只要满足阈值条件, 即 $\gamma > \gamma_{th}$, FSO 链路主站、FSO 链路备份站、RF 链路主站、RF 链路备份站或两条链路等都可能处于活动状态. 双站 FSO/RF 混合链路接收站的状态可以表示为 $G_{kh} (k, h \in \{0, 1, 2, 3\})$, 其中 k 表示 FSO 链路接收站的状态, h 表示 RF 链路接收站的状态, 0 表示主备站都中断, 1 表示主站可用, 2 表示备份站可用, 3 表示主备站都可用. 图 2 所示为软切换双站 FSO/RF 混合系统 FSMC 模型的状态转移图.

假定系统满足齐次马尔科夫条件, 这意味着一步转移概率是固定的, 且不随时间变化. 对于 $k, h, m, n \in \{0, 1, 2, 3\}$, 以及时刻 n , 状态转移概率定义为

$$q_{kh, mn} \triangleq \Pr \{ X_{n+1} = G_{mn} | X_n = G_{kh} \} \tag{9}$$

将一步转移概率写成 Q 的矩阵形式为

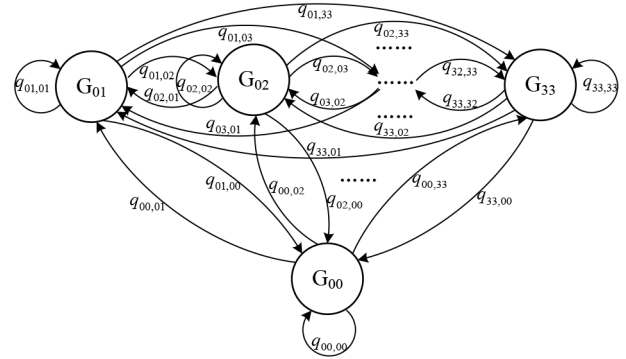


图 2 软切换双站 FSO/RF 混合系统 FSMC 模型状态图

$$Q = \begin{bmatrix} q_{00,00} & q_{00,01} & \cdots & q_{00,33} \\ q_{01,00} & q_{01,01} & \cdots & q_{01,33} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{33,00} & q_{33,01} & \cdots & q_{33,33} \end{bmatrix}_{16 \times 16} \tag{10}$$

使用 q_{kh} 表示状态 G_{kh} 的稳态概率, $q = \{q_{00}, q_{01}, q_{02}, \dots, q_{33}\}^T$, $\{\cdot\}^T$ 表示向量转置. 根据马尔科夫链的稳态方程, 可得

$$\begin{cases} Qq = q \\ \sum_{k=0}^3 \sum_{h=0}^3 q_{kh} = 1 \end{cases} \tag{11}$$

从式(11)中可以看出, 向量 q 是 Q 的右特征向量, 具有单位特征值. 根据定义, 可得稳态概率为

$$\begin{aligned}
 q_{00} &= \Pr \{ \gamma_{F_1} < \gamma_{th1}, \gamma_{F_2} < \gamma_{th1}, \gamma_{R_1} < \gamma_{th2}, \gamma_{R_2} < \gamma_{th2} \} \\
 &= F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{th1}) \times F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{th1}) \times F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th2}) \times F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{th2}) \\
 q_{01} &= \Pr \{ \gamma_{F_1} < \gamma_{th1}, \gamma_{F_2} < \gamma_{th1}, \gamma_{R_1} > \gamma_{th2}, \gamma_{R_2} < \gamma_{th2} \} \\
 &= F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{th1}) \times F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{th1}) \times (1 - F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th2})) \times F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{th2}) \\
 &\dots \\
 q_{33} &= \Pr \{ \gamma_{F_1} > \gamma_{th1}, \gamma_{F_2} > \gamma_{th1}, \gamma_{R_1} > \gamma_{th2}, \gamma_{R_2} > \gamma_{th2} \} \\
 &= (1 - F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{th1})) \times (1 - F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{th1})) \\
 &\quad \times (1 - F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th2})) \times (1 - F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{th2}))
 \end{aligned} \tag{12}$$

其中, $F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{th1})$ 和 $F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{th1})$ 由式(5)给出, $F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{th2})$ 和 $F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{th2})$ 由式(7)给出; γ_{F_1} 和 γ_{F_2} 分别是 γ_{FSO_1} 和 γ_{FSO_2} 的简写, γ_{R_1} 和 γ_{R_2} 分别是 γ_{RF_1} 和 γ_{RF_2} 的简写.

3 中断概率和误码率分析

当通信链路的输出信噪比低于所设定的阈值信噪比时, 链路将处于中断状态. 利用上节的 FSMC 模型, 分别推导出单/双站混合系统的中断概率表达式, 并通过 Meijer' G 函数推导出 FSO/RF 混合链路的误码率性能.

3.1 中断概率

3.1.1 单站 FSO/RF 混合链路的中断概率

单站 FSO/RF 混合链路在四态马尔科夫模型中处于状态 1、状态 2、状态 3 时,通信系统都是可用的. 根据式(8)中状态 0 的稳态概率,其系统中断时的中断概率表达式为

$$P_{\text{out,hyb I}} = P_{\text{out,FSO I}} \times P_{\text{out,RF I}} \quad (13)$$

其中, $P_{\text{out,FSO I}}$ 为单站 FSO 链路的中断概率, $P_{\text{out,RF I}}$ 为单站 RF 链路的中断概率.

FSO 链路的中断概率表示为

$$P_{\text{out,FSO I}} = P(\gamma_{\text{FSO}} < \gamma_{\text{th,FSO}}) = F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{th,FSO}}) \quad (14)$$

将式(5)代入式(14),可得

$$P_{\text{out,FSO I}} = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th,FSO}}}{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \middle| \alpha, \beta, 0 \right] \quad (15)$$

当 RF 链路因恶劣天气引起衰减,导致状态减弱,输出信噪比低于阈值信噪比 $\gamma_{\text{th,RF}}$ 时,RF 链路中断. RF 链路的中断概率表示为

$$P_{\text{out,RF I}} = P(\gamma_{\text{RF}} < \gamma_{\text{th,RF}}) = F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma_{\text{th,RF}}) \quad (16)$$

代入式(7),可得:

$$P_{\text{out,RF I}} = 1 - Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\bar{\gamma}_{\text{RF}}}} \gamma_{\text{th,RF}} \right) \quad (17)$$

3.1.2 双站 FSO/RF 混合链路的中断概率

假定 FSO 链路和 RF 链路都具有两个接收站,分别为主站和备份站. 由于天气变幻,接收站可能会通信中断. 当 FSO 链路主站处于中断状态时,启用 FSO 链路的备份站. 当 FSO 链路主备站都处于中断状态时,链路进行切换,RF 链路被激活. 同样,当 RF 链路主站处于中断状态时,启用 RF 链路的备份站. 当 FSO 链路主备站都中断时,FSO/RF 混合链路中断,此时通信终止.

利用上节建立的 FSMC 模型分析双站 FSO/RF 混合链路的中断概率. 式(12)中 q_{00} 表示 FSO 链路及 RF 链路主备站均中断,称为“混合中断”. 双站 FSO/RF 混合链路中断概率可以表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out,hyb II}} &= P(\gamma_{F_1} < \gamma_{\text{th},F_1}, \gamma_{F_2} < \gamma_{\text{th},F_2}, \gamma_{R_1} < \gamma_{\text{th},R_1}, \gamma_{R_2} < \gamma_{\text{th},R_2}) \\ &= F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{\text{th},F_1}) \times F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{\text{th},F_2}) \times F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{\text{th},R_1}) \times F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{\text{th},R_2}) \\ &= P_{\text{out,FSO II}} \times P_{\text{out,RF II}} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $P_{\text{out,FSO II}}$ 为双站 FSO 链路中断概率, $P_{\text{out,RF II}}$ 为双站 RF 链路中断概率.

当 FSO 链路主备站都中断时,中断概率表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out,FSO II}} &= P(\gamma_{F_1} < \gamma_{\text{th},F_1}, \gamma_{F_2} < \gamma_{\text{th},F_2}) \\ &= F_{\gamma_{F_1}}(\gamma_{\text{th},F_1}) \times F_{\gamma_{F_2}}(\gamma_{\text{th},F_2}) \end{aligned} \quad (19)$$

其中, F_1 和 F_2 分别表示 FSO 链路的主站和备份站, γ_{th,F_1} 和 γ_{th,F_2} 分别为 FSO 链路主站和备份站的阈值信噪比. 由式(5)可得

$$\begin{aligned} P_{\text{out,FSO II}} &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th},F_1}}{\bar{\gamma}_{F_1}}} \middle| \alpha, \beta, 0 \right] \\ &\quad \times \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{2,1} \left[\alpha \beta \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th},F_2}}{\bar{\gamma}_{F_2}}} \middle| \alpha, \beta, 0 \right] \end{aligned} \quad (20)$$

当 RF 链路主备站都中断时,中断概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out,RF II}} &= P(\gamma_{R_1} < \gamma_{\text{th},R_1}, \gamma_{R_2} < \gamma_{\text{th},R_2}) \\ &= F_{\gamma_{R_1}}(\gamma_{\text{th},R_1}) \times F_{\gamma_{R_2}}(\gamma_{\text{th},R_2}) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, R_1 和 R_2 分别表示 RF 链路的主站和备份站, γ_{th,R_1} 和 γ_{th,R_2} 分别为 RF 链路主站和备份站的阈值信噪比. 由式(7)可得

$$\begin{aligned} P_{\text{out,RF II}} &= \left(1 - Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\bar{\gamma}_{R_1}}} \gamma_{\text{th},R_1} \right) \right) \\ &\quad \times \left(1 - Q_1 \left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\bar{\gamma}_{R_2}}} \gamma_{\text{th},R_2} \right) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

3.2 误码率

FSO/RF 混合链路采用 MPSK 调制时,在瞬时信噪比为 γ_i 的误码率可统一表示为

$$\begin{aligned} P(e|\gamma_i) &= \frac{A}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_i} B) \\ i &= \text{FSO, RF} \end{aligned} \quad (23)$$

其中,当 $M=2$ (BPSK) 时, $A=1, B=1$; 当 $M>2$ 时, $A = \frac{2}{\log_2 M}, B = \sin \frac{\pi}{M}$, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数.

FSO/RF 混合链路非中断时的平均误码率可以根据 FSO 链路和 RF 链路非中断时的平均误码率来计算,可以表示为

$$\bar{P}_{\text{b,hyb}} = \frac{\bar{P}_{\text{b,FSO}} + P_{\text{out,FSO I}} \bar{P}_{\text{b,RF}}}{1 - P_{\text{out,hyb I}}} \quad (24)$$

其中, $P_{\text{out,FSO I}}$ 由式(15)给出, $P_{\text{out,hyb I}}$ 由式(13)给出, $\bar{P}_{\text{b,FSO}}$ 和 $\bar{P}_{\text{b,RF}}$ 分别是 FSO 链路和 RF 链路的平均误码率.

FSO 链路的平均误码率表达式为

$$\bar{P}_{\text{b,FSO}} = \int_0^{\infty} P(e|\gamma_{\text{FSO}}) f_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma_{\text{FSO}}) d\gamma_{\text{FSO}} \quad (25)$$

将式(5)和式(23)代入式(25)中,并将被积函数表示为 Meijer'G 函数,得到 FSO 链路的平均误码率表达式为

$$\bar{P}_{b, \text{FSO}} = \frac{2^{\alpha+\beta-3} A}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\pi^2} G_{2.5}^{4.2} \left[\frac{(\alpha\beta)^2}{16\bar{\gamma}_1 B^2} \left| \begin{matrix} \frac{1}{2}, 1 \\ \frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha+1}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{\beta+1}{2}, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (26)$$

RF链路的平均误码率表达式为

$$\bar{P}_{b, \text{RF}} = \int_0^\infty P(e|\gamma_{\text{RF}}) f_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma_{\text{RF}}) d\gamma_{\text{RF}} \quad (27)$$

使用分部积分并令 $x = B\sqrt{2\gamma_{\text{RF}}}$, 可将式(27)简化为

$$\bar{P}_{b, \text{RF}} = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) F_{\gamma_{\text{RF}}}\left(\frac{x^2}{2B^2}\right) dx \quad (28)$$

将式(7)代入式(28), 并使用 Q 函数相关公式, 可得

$$\begin{aligned} \bar{P}_{b, \text{RF}} = & A Q_1 \left(\sqrt{\frac{K}{2}}(1-q), \sqrt{\frac{K}{2}}(1+q) \right) \\ & - \frac{A(1+q)}{2} \exp\left(-\frac{K(1+q^2)}{2}\right) I_0\left(\frac{pKq^2}{2}\right) \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $q = \frac{1}{\sqrt{1+p}}, p = \frac{(1+K)}{\bar{\gamma}_{\text{RF}} B^2}$.

4 数值结果

根据上节得出的 FSO/RF 混合链路的误码率和中断概率的闭合表达式, 以及 FSO 链路和 RF 链路在不同天气环境下受到的影响, 本节对不同链路距离、不同天气条件下 FSO/RF 混合链路的误码率和中断性能进行数值分析. FSO 和 RF 链路的相关参数以及各种天气衰减相关数值分别如表 1 和表 2 所示.

根据式(13)、式(15)和式(17), 在雨雾条件下计算得到通信链路的中断性能, 如图 3 所示. 其中, 图 3(a) 为在中雨条件下链路距离分别为 3 km 和 7 km 时, 仅 FSO 链路、仅 RF 链路及 FSO/RF 混合链路关于功率的中断性能; 图 3(b) 为在薄雾条件下链路距离分别为 1 km 和 2 km 时, 仅 FSO 链路、仅 RF 链路及 FSO/RF 混合链路关于功率的中断性能. 由图中曲线可以看出, 不同天气条件、不同链路距离下, FSO/RF 混合链路的性能都优于 FSO 与 RF 单链路的性能. 例如, 中雨条件下, 当链路距离为 3 km 时, 在 50 dBm 的发射功率下, FSO/RF 混合链路的中断概率为 1.3×10^{-7} , FSO 与 RF 单链路的中断概率分别为 7.8×10^{-5} 和 1.6×10^{-3} .

图 4 所示为根据式(24)在雨雾条件下计算得到的 FSO/RF 混合链路关于发射功率的误码率. 设定 $\gamma_{\text{th, FSO}} = 10 \text{ dB}, \gamma_{\text{th, RF}} = 5 \text{ dB}$. 其中, 图 4(a) 为不同雨量、不同链路距离时发射功率与误码率的关系; 图 4(b) 为不同能见度、不同链路距离时发射功率与误码率的关系. 如图中所示, 雨雾条件下, 链路距离越长, 达到同一误码率时, FSO/RF 混合链路正常通信所需发射功率越大; 同一链

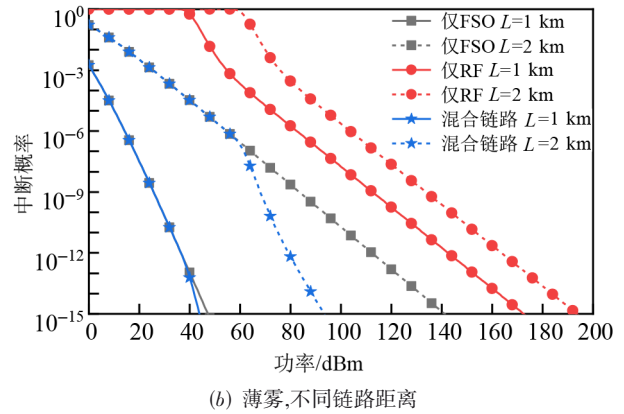
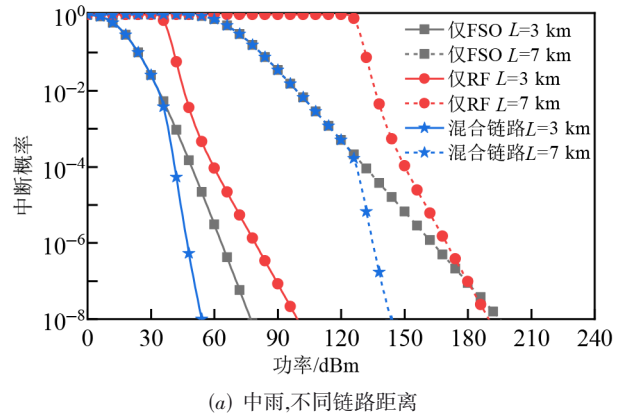
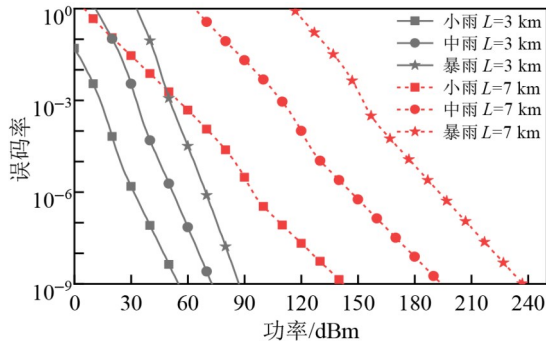


图 3 雨雾条件下, FSO/RF 混合链路的中断概率

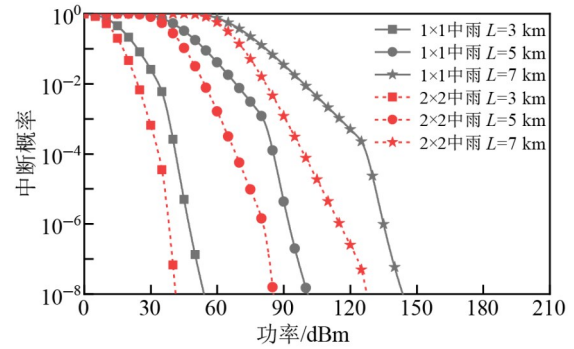
路距离时, 天气条件越恶劣, 误码率性能越差. 例如, 当链路距离为 3 km, 发射功率为 40 dBm 时, 小雨的误码率为 8.1×10^{-8} , 中雨的误码率为 4.8×10^{-5} , 暴雨的误码率为 9.1×10^{-2} .

图 5 所示为根据式(13)和式(18)在雨天条件下计算得到的单/双站 FSO/RF 混合链路关于发射功率的中断概率. 设定 $\gamma_{\text{th, FSO}} = 10 \text{ dB}, \gamma_{\text{th, RF}} = 10 \text{ dB}$. 其中, 图 5(a) 是在中雨条件下链路距离分别为 3 km, 5 km, 7 km 时, 发射功率与中断概率的关系. 若中断概率要求 10^{-8} , 当链路距离为 3 km 时, 单站 FSO/RF 混合链路所需的发射功率为 50 dBm 左右. 随着链路距离的增加, 所需的发射功率也在增大, 链路距离为 7 km 时, 所需发射功率为 140 dBm 左右. 图 5(b) 是链路距离为 5 km 时, 在不同降雨量条件下发射功率与中断概率的关系. 图中表明, 随着降雨强度的增大, 达到同一中断时, 通信链路所需的发射功率也变得更大. 当中断概率为 10^{-6} 时, 单站 FSO/RF 混合链路在暴雨条件下比在小雨条件下所需的发射功率增加量为 50 dB 左右.

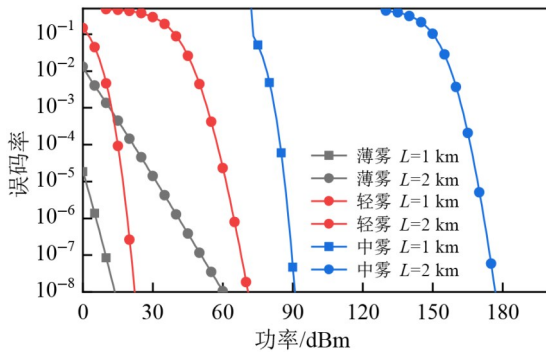
图 6 所示为单/双站 FSO/RF 混合链路在雾天条件下中断概率随发射功率的变化. 设定 $\gamma_{\text{th, FSO}} = 10 \text{ dB}, \gamma_{\text{th, RF}} = 70 \text{ dB}$. 其中, 图 6(a) 是在轻雾条件下链路距离分别为 1 km, 1.5 km, 2 km 时, 发射功率与中断概率的关



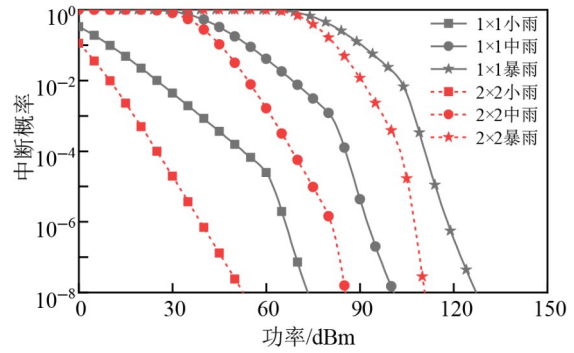
(a) 不同降雨率,不同链路距离



(a) 中雨,不同链路距离



(b) 不同雾天,不同链路距离



(b) $L=5000\text{ m}$,不同降雨量

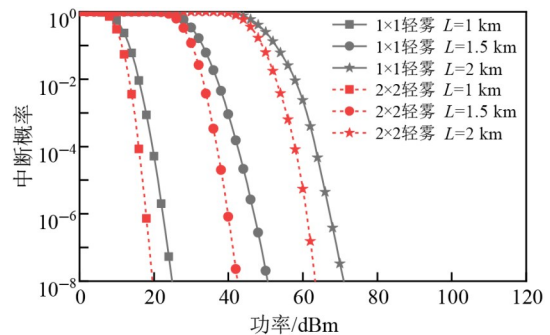
图4 雨雾条件下FSO/RF混合链路的误码率

图5 雨天条件下FSO/RF混合链路的中断概率

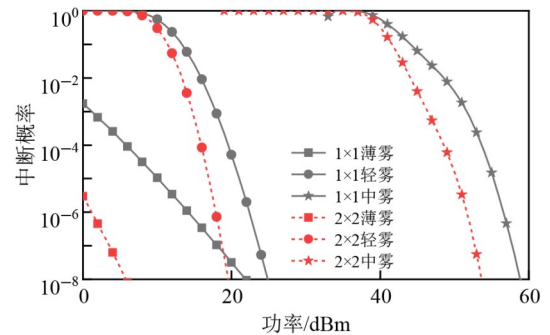
系;图6(b)是链路距离为1 km时,在薄雾、轻雾、中雾条件下发射功率与中断概率的关系.与图5类似,在雾天条件下,随着链路距离的增加,混合链路正常通信所需的发射功率也在不断增大;当链路距离为1 km,中断概率为 10^{-6} 时,单站FSO/RF混合链路在中雾条件下比在薄雾条件下所需的发射功率增加了40 dB左右.

图5和图6均对单/双站FSO/RF混合链路的的中断概率进行了对比.从图中可以看出,相比单站FSO/RF混合链路,双站FSO/RF混合链路性能更好,达到同一中断时,所需的发射功率也更低.当中断概率为 10^{-6} 时,不同链路距离、不同天气条件下单/双站FSO/RF混合链路所需发射功率的值如表4所示.

表3为当误码率达到 10^{-9} 时,不同链路距离、不同天气条件下FSO/RF混合链路所需发射功率的值.当链路距离分别为3 km和7 km时,FSO/RF混合链路在暴雨条件下正常通信所需的发射功率比小雨条件下分别增加了32.1 dB和94.9 dB.当天气条件分别为薄雾、轻雾、中雾时,FSO/RF混合链路在链路距离为2 km时正常通信所需发射功率比链路距离为1 km时分别增加了52.3 dB,50 dB,86.9 dB.数值结果表明,链路距离的增加以及恶劣的天气条件都会影响链路性能,导致系统可靠性降低.



(a) 轻雾,不同链路距离



(b) $L=1000\text{ m}$,不同能见度

图6 雾天条件下FSO/RF混合链路的的中断概率

表 3 误码率 10^{-9} 对应的 FSO/RF 混合链路的发射功率

天气	发射功率/dBm		天气	发射功率/dBm	
	L=3 km	L=7 km		L=1 km	L=2 km
小雨	54.9	142.2	薄雾	17.4	69.7
中雨	72.7	194.0	轻雾	23.6	73.6
暴雨	87.0	237.1	中雾	62.0	148.9

表 4 所示为当中断概率达到 10^{-6} 时,不同链路距离、不同天气条件下 FSO/RF 混合链路所需发射功率的值.如表中所示,当中断概率达到 10^{-6} 时,在中雨条件

表 4 中断概率 10^{-6} 对应的单/双站 FSO/RF 混合链路的发射功率

天气	链路距离/km	发射功率/dBm		链路距离/km	天气	发射功率/dBm	
		单接收站	双接收站			单接收站	双接收站
中雨	3	47.1	38.1	5	小雨	66.8	42.0
	5	92.2	80.6		中雨	92.2	80.6
	7	134.9	115.2		暴雨	117.9	107.3
轻雾	1	22.3	17.8	1	薄雾	14.1	1.1
	1.5	46.8	39.8		轻雾	22.3	17.8
	2	67.2	61.0		中雾	56.5	51.6

5 结论

针对恶劣天气对 FSO 链路和 RF 链路有着严重影响的问题,本文采用 FSMC 模型分别对单/双站 FSO/RF 混合链路切换所需的链路选择进行建模,推导得出 FSO/RF 混合链路中断概率和误码率的闭合表达式.同时,通过数值结果分析了雨雾及链路距离的影响.结果表明,在不同天气条件、不同链路距离下,FSO/RF 混合链路的性能都优于 FSO 与 RF 单链路的性能;链路距离的增加以及恶劣的天气条件都会影响链路性能,导致系统可靠性降低;当中断概率达到 10^{-6} 时,相比单站 FSO/RF 混合链路,双站 FSO/RF 混合链路可获得 4~25 dB 的增益改善,双站 FSO/RF 混合链路比单站 FSO/RF 混合链路性能更好,通信更可靠.

参考文献

- [1] RAKIA T, YANG H C, ALOUINI M S, et al. Outage analysis of practical FSO/RF hybrid system with adaptive combining[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1366-1369.
- [2] VISWANATH A, JAIN V K, KAR S. Analysis of earth-to-satellite free-space optical link performance in the presence of turbulence, beam-wander induced pointing error and weather conditions for different intensity modulation schemes[J]. IET Communications, 2015, 9(18): 2253-2258.
- [3] IZADPANAH H, ELBATT T, KUKSHYA V, et al. High-

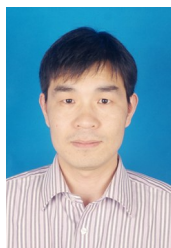
下,链路距离分别为 3 km, 5 km, 7 km 时,双站 FSO/RF 混合链路所需发射功率分别比单站低 9 dB, 11.6 dB, 19.7 dB. 在轻雾条件下,链路距离分别为 1 km, 1.5 km, 2 km 时,双站 FSO/RF 混合链路所需发射功率分别比单站低 4.5 dB, 7 dB, 6.2 dB. 当链路距离为 5 km, 天气条件分别为小雨、中雨、暴雨时,双站 FSO/RF 混合链路所需发射功率分别比单站低 24.8 dB, 11.6 dB, 10.6 dB. 当链路距离为 1 km, 天气条件分别为薄雾、轻雾、中雾时,双站 FSO/RF 混合链路所需发射功率分别比单站低 13 dB, 4.5 dB, 4.9 dB. 综上所述,双站 FSO/RF 混合链路比单站 FSO/RF 混合链路性能更好.

availability free space optical and RF hybrid wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2003, 10(2): 45-53.

- [4] TATARKO M, OVSENIK L, TURAN J. Properties of hybrid FSO/RF link with 60 GHz RF backup link[C]//2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Piscataway: IEEE, 2013: 495-497.
- [5] ZHANG Y, PARK Y, KIM B, et al. Performance analysis of hybrid FSO/RF system[C]//2011 Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE, 2011: 279-283.
- [6] AKBULUT A, ILK H G, ARI F. Design, availability and reliability analysis on an experimental outdoor FSO/RF communication system[C]//Proceedings of 2005 7th International Conference Transparent Optical Networks. Piscataway: IEEE, 2005: 403-406.
- [7] JIA Z H, AO F L, ZHU Q L. BER performance of the hybrid FSO/RF attenuation system[C]//2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory. Piscataway: IEEE, 2007: 1-4.
- [8] NADEEM F, LEITGEB E, KHAN M S, et al. Availability simulation of switch over for FSO and MMW[C]//2007 International Conference on Information and Emerging Technologies. Piscataway: IEEE, 2007: 1-5.
- [9] NADEEM F, LEITGEB E, KVICERA V, et al. Simulation

- and analysis of FSO/RF switch over for different atmospheric effects[C]//2009 10th International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE, 2009: 39-43.
- [10] KAZEMI H, UYSAL M, TOUATI F. Outage analysis of hybrid FSO/RF systems based on finite-state Markov chain modeling[C]//2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW). Piscataway: IEEE, 2014: 11-15.
- [11] SHAKIR W M R, MAHDI A S. Errors rate analysis of the hybrid FSO/RF systems over foggy-weather fading-induced channel[C]//2019 4th Scientific International Conference Najaf (SICN). Piscataway: IEEE, 2020: 156-160.
- [12] NADEEM F, KVICERA V, AWAN M S, et al. Weather effects on hybrid FSO/RF communication link[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1687-1697.
- [13] KIM I I, MCARTHUR B, KOREVAAR E J. Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications[C]//Conference on Optical Wireless Communications. Bellingham: SPIE, 2001: 26-37.
- [14] MAJUMDAR A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel[J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2005, 2(4): 345-396.
- [15] HE B, SCHOBER R. Bit-interleaved coded modulation for hybrid RF/FSO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(12): 3753-3763.
- [16] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.

作者简介



邵军虎 男,1980年生,山西永济人.西安理工大学讲师.主要研究方向为差错控制编码技术.

E-mail: jhshao@xaut.edu.cn



杜旭晓 女,1999年生,陕西渭南人.西安理工大学硕士研究生.主要研究方向为激光微波混合组网技术.

E-mail: 1540585729@qq.com