

# 激光与光电子学进展

## 基于解码转发中继的三跳 RF/FSO/RF 航空通信链路性能分析

刘文亚<sup>1\*</sup>, 王翔<sup>1</sup>, 赵尚弘<sup>1</sup>, 牟迪<sup>1</sup>, 高航航<sup>2</sup>

<sup>1</sup>空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

<sup>2</sup>294638 部队, 江西 南昌 330000

**摘要** 研究基于解码转发(DF)中继的三跳混合射频/自由空间光/射频(RF/FSO/RF)航空通信链路性能。航空子节点到骨干节点为 RF 链路, 骨干节点之间为 FSO 链路, 并假设三跳中的调制方式相同, RF 信道服从 Nakagami- $m$  衰落模型, FSO 信道服从 Exponentiated Weibull 大气湍流分布模型。推导了端到端中断概率(OP)和平均误码率(BER)的闭合表达式, 分析了大气湍流强度、RF 信道衰落系数及不同调制方式对系统 OP、平均 BER 性能的影响。结果表明: 在三跳 DF 中继方式下, 最优的 OP、BER 性能取决于信道质量最差的一跳, 二进制相移键控(BPSK)调制误码性能要优于二进制频移键控(BFSK)调制及高阶 PSK 调制。推导的闭合表达式有利于量化分析链路性能, 为系统设计提供参考。

**关键词** 光通信; RF/FSO/RF 通信链路; Exponentiated Weibull 分布模型; Nakagami- $m$  衰落信道; 平均误码率; 中断概率

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0306004

### Performance Analysis of a Three-Hop RF/FSO/RF Airborne Communication Link Based on Decode-and-Forward Relaying

Liu Wenya<sup>1\*</sup>, Wang Xiang<sup>1</sup>, Zhao Shanghong<sup>1</sup>, Mu Di<sup>1</sup>, Gao Hanghang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

<sup>2</sup>294638 Troops, Nanchang, Jiangxi 330000, China

**Abstract** In this study, the performance of a three-hop hybrid radio frequency/free space optical/radio frequency (RF/FSO/RF) airborne communication link based on decode-and-forward (DF) relaying is investigated. The connection link between the airborne subnode and the backbone node is the RF link, whereas that between the airborne backbone node and the backbone node is the FSO link. The same modulation method is assumed in the three hops. The RF channel is characterized using the Nakagami- $m$  fading model, and the FSO channel follows the Exponentiated Weibull atmospheric turbulence distribution model. Further, closed expressions are obtained for the end-to-end outage probability (OP) and the average bit error rate (BER). Subsequently, the effects of turbulence intensities, RF channel fading coefficients, and modulation modes on the OP and average BER are analyzed. The obtained results indicate that in the three-hop DF relaying mode, the optimal OP and BER are dependent on the hop with the worst channel quality. Furthermore, binary phase shift keying (BPSK) modulation outperforms binary frequency shift keying (BFSK) modulation and high-order PSK with respect to the BER. The deduced closed expression is conducive for quantitatively analyzing the link performance and provides a reference for system design.

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-07-12; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 陕西省自然科学基金(2020JQ-483)

\*E-mail: kyllnlwy@163.com

**Key words** optical communications; RF/FSO/RF communication link; Exponentiated Weibull distribution model; Nakagami- $m$  fading channel; average bit error rate; outage probability  
**OCIS codes** 060.4510; 010.1330; 200.2605; 200.4650

## 1 引言

以射频(RF)为主的航空通信基本满足导航、话音等业务需求,但因其易受同频干扰影响及带宽的局限,不能无限制地扩展<sup>[1-2]</sup>。自由空间光(FSO)通信因具有抗干扰能力强、带宽宽、天线尺寸小、功耗低、保密性好及部署成本低的优点而备受关注,是实现未来航空通信大容量、抗电磁干扰传输的重要手段之一<sup>[3-4]</sup>。然而,FSO通信光束要求有较高的对准性,易受沙尘暴、大雾等恶劣天气影响,即使在晴朗的天气下,也容易受大气湍流的影响<sup>[5-6]</sup>;RF通信链路主要受雨衰的影响,对沙尘暴、云雾及大气湍流等因素不敏感<sup>[7]</sup>。RF和FSO链路在不同的频带上运行时,能避免相近链路之间的信号干扰。因而综合考虑环境对FSO和RF信道的不同影响及两者各自优势,将两者混合应用可以提高航空通信性能,有望实现高速、可靠、稳定、抗干扰的混合RF/FSO航空通信系统。在混合RF/FSO航空通信系统中,RF链路可用于将高速子节点接入骨干节点,而FSO链路用于航空低速骨干节点之间的通信<sup>[8]</sup>,从而形成中继多跳混合RF/FSO通信方案。

目前,关于中继辅助的混合RF/FSO通信的研究大多基于双跳单中继混合RF/FSO通信方案,研究不同信道模型和不同中继协议下的系统性能<sup>[9-12]</sup>。其中,文献[9]基于Gamma-Gamma和Rayleigh信道模型,研究了采用解码转发(DF)的MIMO-RF/FSO混合传输链路性能,得到了中断概率(OP)和误码率(BER)精准的闭合表达式。韩立强等<sup>[10-11]</sup>基于Gamma-Gamma与Rayleigh信道模型,研究了采用放大转发(AF)中继的双跳RF/MIMO-FSO系统的OP、BER及容量性能。Zedini等<sup>[12]</sup>基于Gamma-Gamma和Rayleigh信道模型,研究了采用DF中继的双跳RF/FSO混合传输链路性能,推导了OP、BER及遍历容量精准的闭合表达式。文献[13]基于Exponentiated Weibull与Nakagami- $m$ 信道模型,研究了采用DF中继的双跳RF/FSO混合传输链路性能,得到了OP与BER的闭合表达式。对于中继方式,无线通信中常用的

中继协作方式有AF和DF<sup>[14]</sup>,其中AF具有更低的复杂度,而DF可以滤除噪声,避免多跳中噪声的累积。对于FSO湍流信道,用于表征中到强湍流光强起伏的Gamma-Gamma分布被广泛使用<sup>[9-12]</sup>,但其不适用于孔径平均效应下的FSO通信,孔径平均效应可有效抑制大气湍流对FSO通信的影响。Barrios等<sup>[15-16]</sup>提出并通过实验验证的Exponentiated Weibull分布模型适用于弱到强湍流及平均孔径条件下的大气湍流信道。

针对远距离航空子节点间的互联互通问题,本文研究了三跳RF/FSO/RF航空通信链路性能。其中,FSO链路采用Exponentiated Weibull分布模型,RF信道衰落服从Nakagami- $m$ 分布,中继节点均采用DF协议。推导出了三跳RF/FSO/RF航空通信系统OP和平均BER闭合表达式,通过闭合表达式进行数值仿真,对比分析了湍流强度、RF信道衰落强度、调制方式对系统中断、误码性能的影响。

## 2 系统及信道模型

三跳RF/FSO/RF航空通信链路模型如图1所示,其中,S、D为航空平台子节点, $R_1$ 、 $R_2$ 为航空平台骨干节点。子节点移动速度要高于骨干节点,因而子节点到骨干节点的通信链路采用RF通信,而骨干节点移动速度慢且通信容量要求高,因而骨干节点采用FSO通信,中继节点均采用DF方式,以避免每一跳噪声的累积。

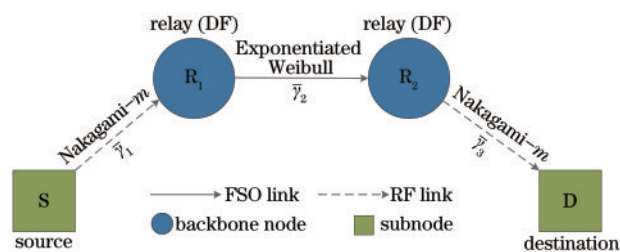


图1 三跳RF/FSO/RF航空通信链路模型

Fig. 1 Three-hop RF/FSO/RF airborne communication link model

### 2.1 RF链路

假设不同骨干节点下的子节点由于距离受限不能互通,需要通过中继骨干节点传输信息,端到

端传输分为三跳, S-R<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>、R<sub>2</sub>-D, 每一跳链路的瞬时信噪比(SNR)分别用  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  表示。第一跳 RF 信号接收端 R<sub>1</sub> 的接收信号  $y_{RF}$  可表示为

$$y_{RF} = \sqrt{P_s} h_{RF} x + n_{RF}, \quad (1)$$

式中:  $x$  为源节点 S 传输的  $E\{|x|^2\} = 1$  信号,  $E\{\cdot\}$  表示期望符号;  $P_s$  为源节点端 S 的发射功率;  $h_{RF}$  为从 S 到 R<sub>1</sub> 的衰落信道的系数;  $n_{RF}$  是均值为 0、功率为  $N_0$  的加性高斯白噪声信号。因此, R<sub>1</sub> 处的瞬时信噪比可以表示为  $\gamma_1 = \frac{P_s}{N_0} |h_{RF}|^2$ 。假设 RF 信道衰落系数遵循 Nakagami- $m$  衰落模型, 瞬时信噪比  $\gamma_1$  的概率密度函数(PDF)表达式<sup>[17]</sup>为

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1}\right)^{m_{sr}} \frac{\gamma^{m_{sr}-1}}{\Gamma(m_{sr})} \exp\left(-\frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right), \quad (2)$$

式中:  $m_{sr}$  为 S-R<sub>1</sub> 链路 Nakagami- $m$  信道衰落指数, 且  $m_{sr} \geq 1/2$ ,  $m_{sr}$  值越大, 信道衰落越弱, 当  $m_{sr} = 1$  时, 信道衰落退化为瑞利衰落;  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数;  $\bar{\gamma}_1$  为 S-R<sub>1</sub> 链路平均信噪比。R<sub>1</sub> 接收端瞬时信噪比  $\gamma_1$  的累积分布函数(CDF)<sup>[17]</sup>表示为

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m_{sr})} \gamma \left(m_{sr}, \frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right), \quad (3)$$

式中:  $\gamma(\cdot)$  为下不完全伽马函数。

同理, 在第三跳 RF 链路接收端 D 处, 瞬时信噪比  $\gamma_3$  的概率密度函数表达式为  $f_{\gamma_3}(\gamma) =$

$$\left(\frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)^{m_{rd}} \frac{\gamma^{m_{rd}-1}}{\Gamma(m_{rd})} \exp\left(-\frac{m_{rd}\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right), \gamma_3 \text{ 的 CDF 为 } F_{\gamma_3}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m_{rd})} \gamma \left(m_{rd}, \frac{m_{rd}\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right)。$$

### 2.2 FSO 链路

R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> 链路采用 FSO 传输, 接收端 R<sub>2</sub> 的接收信号  $y_{FSO}$  可以表示为

$$y_{FSO} = RP_r I_{FSO} \hat{x} + n_{FSO}, \quad (4)$$

式中:  $R$  为光电转换效率;  $P_r$  为 R<sub>1</sub> 发射功率;  $I_{FSO}$  为大气湍流引起的接收面上的电场及辐照度波动系数;  $\hat{x}$  为 R<sub>1</sub> 节点发送的调制信号;  $n_{FSO}$  是均值为 0、功率为  $N_1$  的加性高斯白噪声信号。因此, R<sub>2</sub> 处的瞬时信噪比可以表示为  $\gamma_2 = \frac{(RP_r)^2}{N_1} |I_{FSO}|^2 = \bar{\gamma}_2 |I_{FSO}|^2$ ,  $\bar{\gamma}_2$  为第二跳激光链路的平均信噪比。

在 R<sub>2</sub> 接收端采用大孔径接收技术, 考虑孔径平均效应,  $I_{FSO}$  服从 Exponentiated Weibull 分布, 则 R<sub>2</sub> 接收端瞬时信噪比  $\gamma_2$  的 PDF<sup>[13,15]</sup> 表示为

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{\alpha\beta}{2\bar{\gamma}_2\eta^\beta} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^{\beta-2} \times \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right] \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1}. \quad (5)$$

相应地, R<sub>2</sub> 接收瞬时信噪比  $\gamma_2$  的 CDF<sup>[13,15]</sup> 表示为

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha, \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\eta$  均为与大气湍流强度及湍流尺度有关的参数, 且  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\eta > 0$ <sup>[15-16]</sup>。文献[15-16]中给出了  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$  通过曲线拟合得到的参数经验公式, 具体参数值可通过公式计算得到。

### 3 信噪比模型

S-R<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>、R<sub>2</sub>-D 链路的瞬时信噪比分别为  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ , 平均信噪比分别为  $\bar{\gamma}_1$ 、 $\bar{\gamma}_2$ 、 $\bar{\gamma}_3$ 。对于 S-R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>-D 链路, 中继点均采用解码转发方式, 假设三跳的信道相互独立且互不干扰, 则链路端到端等价信噪比<sup>[14]</sup>为

$$\gamma_{eq} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3). \quad (7)$$

则端到端瞬时信噪比  $\gamma_{eq}$  的 CDF 为

$$F_{\gamma_{eq}}(\gamma) = \Pr[\gamma \leq \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)] = 1 - \left\{ [1 - F_{\gamma_1}(\gamma)][1 - F_{\gamma_2}(\gamma)][1 - F_{\gamma_3}(\gamma)] \right\} = 1 - \left\{ \left[1 - \frac{1}{\Gamma(m_{sr})} \gamma \left(m_{sr}, \frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right)\right] \times \left\{1 - \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha\right\} \times \left[1 - \frac{1}{\Gamma(m_{rd})} \gamma \left(m_{rd}, \frac{m_{rd}\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right)\right] \right\}, \quad (8)$$

式中: 依据不完全伽马函数展开式[18, eq (3.351)]  $\gamma(m, x) = (m-1)! \left(1 - e^{-x} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{x^j}{j!}\right)$ , 将不完全伽

马函数展开,  $\frac{1}{\Gamma(m_{sr})} \gamma\left(m_{sr}, \frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right) \sum_{r_1=0}^{m_{sr}-1} \frac{1}{r_1!} \left(\frac{m_{sr}\gamma}{\bar{\gamma}_1}\right)^{r_1}$ ,  $\frac{1}{\Gamma(m_{rd})} \gamma\left(m_{rd}, \frac{m_2\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{m_{rd}\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right) \sum_{r_2=0}^{m_{rd}-1} \frac{1}{r_2!} \left(\frac{m_{rd}\gamma}{\bar{\gamma}_3}\right)^{r_2}$ 。根据牛顿广义二项式定理, 可将  $\left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha$  展开为  $\sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} (-1)^i \left\{\exp\left[-i\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}$ ,  $i$  为整数, 将其代入(8)式可得

$$F_{\gamma_{eq}}(\gamma) = 1 - \left\{ \sum_{r_1=0}^{m_{sr}-1} \sum_{r_2=0}^{m_{rd}-1} \frac{1}{r_1!} \frac{1}{r_2!} \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)^{r_2} \gamma^{r_1+r_2} \exp\left[-\left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1} + \frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)\gamma\right] \right\} + \left\{ \sum_{r_1=0}^{m_{sr}-1} \sum_{r_2=0}^{m_{rd}-1} \frac{1}{r_1!} \frac{1}{r_2!} \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)^{r_2} \times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} (-1)^i \gamma^{r_1+r_2} \exp\left[-\left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1} + \frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)\gamma\right] \times \left\{\exp\left[-i\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\} \right\} \quad (9)$$

### 3.1 中断概率

对于通信系统来说, 系统中断概率是衡量通信系统传输可靠性的重要指标之一, 可表示为接收端信号的信噪比低于某个信噪比阈值  $\gamma_{th}$  的概率。因

此, 可将中断概率表达为

$$P_{out}(\gamma_{th}) = P(\gamma < \gamma_{th}) = F(\gamma_{th}) \quad (10)$$

将(8)式代入(10)式, 可得

$$P_{out}(\gamma_{th}) = P(\gamma < \gamma_{th}) = F_{\gamma_{eq}}(\gamma_{th}) = 1 - \left[1 - F_{\gamma_1}(\gamma_{th})\right] \left[1 - F_{\gamma_2}(\gamma_{th})\right] \left[1 - F_{\gamma_3}(\gamma_{th})\right] = 1 - \left\{ \left[1 - \frac{1}{\Gamma(m_{sr})} \gamma\left(m_{sr}, \frac{m_{sr}\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_1}\right)\right] \times \left\{1 - \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]\right\}^\alpha\right\} \times \left[1 - \frac{1}{\Gamma(m_{rd})} \gamma\left(m_{rd}, \frac{m_2\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_3}\right)\right] \right\} \quad (11)$$

### 3.2 平均误码率

对于二进制相移键控(BPSK)、二进制频移键控(BFSK)、正交相移键控(QPSK)、多进制相移键控(MPSK)调制来说, 瞬时误码率统一的表达式<sup>[19]</sup>为

$$P_e(\gamma) = A \operatorname{erfc}(\sqrt{B\gamma}), \quad (12)$$

式中:  $A$ 、 $B$  参数如表 1 所示, 参数  $M$  代表  $M$  进制, 一般为 4 的整数倍;  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  为互补误差函数。对(12)式进行求导, 可得到瞬时误码率的一阶导数表达式,

$$P_e'(\gamma) = -\frac{A\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} \gamma^{-1/2} \exp(-B\gamma) \quad (13)$$

根据接收端的瞬时信噪比及其概率密度函数, 可推导出通信系统平均误码率的闭合表达式。系统的平均误码率<sup>[7]</sup>为

$$\bar{P}_e = \int_0^{\infty} P_e(\gamma) f_{\gamma_{eq}}(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

表 1 不同调制方式的  $A$ 、 $B$  值

Table 1  $A$ ,  $B$  of different modulation schemes

Scheme	$A$	$B$	$M$
BPSK	1/2	1	
BFSK	1/2	1/2	
QPSK	1	1/2	
MPSK	1	$\sin^2(\pi/M)$	$> 4$

累积分布函数  $F_\gamma(\gamma)$  有界且  $F_\gamma(0) = 0$ , 误码率  $P_e(\gamma)$  有界且  $P_e(\infty) = 0$ , 利用分部积分法计算反常积分式(14)式, 可得

$$\bar{P}_e = -\int_0^{\infty} F_{\gamma_{eq}}(\gamma) P_e'(\gamma) d\gamma \quad (15)$$

将(13)式代入(15)式, 可得

$$\bar{P}_e = \frac{A\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \gamma^{-1/2} \exp(-B\gamma) F_{\gamma_{eq}}(\gamma) d\gamma \quad (16)$$



将(9)式代入(16)式,对于表达式中的前两项,根据指数与任意幂函数的积分性质[18, eq(3.3814)]进行求解。对于第三项,利用Meijer G函数的性质[20, eq(07.34.03.0228.01)]将指数项  $\exp\left[-i\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\right]$  写为  $G_{0,1}^{1,0}\left[i\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\middle| - \right]$ ,

$G_{0,1}^{1,0}\left[i\left(\frac{1}{\eta}\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_2}}\right)^\beta\middle| - \right]$ 为Meijer G函数,根据Meijer G函数的积分性质[20, eq(07.34.21.0088.01)]进行化简,最终可得平均误码率的闭合表达式为

$$\begin{aligned} \bar{P}_e = & \frac{A\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(0.5)}{B^{0.5}} - \frac{A\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} \sum_{r_1=0}^{m_{sr}-1} \sum_{r_2=0}^{m_{rd}-1} \frac{1}{r_1!} \frac{1}{r_2!} \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)^{r_2} \frac{\Gamma(r_1+r_2-1/2)}{\left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1} + \frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3} + B\right)^{r_1+r_2-1/2}} + \\ & \frac{A\sqrt{B}}{\sqrt{\pi}} \sum_{r_1=0}^{m_{sr}-1} \sum_{r_2=0}^{m_{rd}-1} \frac{1}{r_1!} \frac{1}{r_2!} \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3}\right)^{r_2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} (-1)^i \frac{k^{1/2} l^{r_1+r_2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} \\ & \left(\frac{m_{sr}}{\bar{\gamma}_1} + \frac{m_{rd}}{\bar{\gamma}_3} + B\right)^{-(1/2+r_1+r_2)} G_{l,k}^{k,l} \left[ \left(\frac{i}{k(\eta\sqrt{\bar{\gamma}_2})^\beta}\right)^k \times \left(\frac{\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_3 l}{m_{rd}\bar{\gamma}_1 + m_{sr}\bar{\gamma}_3 + B\bar{\gamma}_1\bar{\gamma}_3}\right)^l \middle| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2-r_1-r_2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $\Delta(K, A) = \frac{A}{K}, \frac{A+1}{K}, \dots, \frac{A+K-1}{K}$ ;  $l$  和  $k$  为满足  $l/k = \beta/2$  的正整数,且  $\gcd(l, k) = 1$ ,  $\gcd$  为最大公约数。

### 4 链路性能分析

根据中断概率的闭合表达式(11)式和平均误码率闭合表达式(17)式,分析不同湍流强度、不同RF信道衰落系数及各种调制方式下三跳RF/FSO/RF航空通信系统链路性能。表2、3列出了设置参数值。在数值仿真中,对于中断概率,假设链路的中断信噪比阈值  $\gamma_{th} = 10$  dB,对于(17)式中的无穷级数形式,在数值仿真时设置  $i = 50$ ,此时平均误码率表达式可基本收敛。

表2 系统参数

Table 2 System parameters

Parameter	Symbol	Value
FSO link distance (R <sub>1</sub> -R <sub>2</sub> )	$L$ /km	100
Laser wavelength	$\lambda$ /nm	1550
Optical-to-electrical conversion efficiency	$R$	1
Receiver diameter	$D$ /mm	200
Bandwidth	$B_{band}$ /MHz	250
RF link distance(S-R <sub>1</sub> )	$L_1$ /km	70
RF link distance(R <sub>1</sub> -D)	$L_2$ /km	70
RF carrier frequency	$f$ /GHz	60
Noise power spectral density	$N$ /(dBm · MHz <sup>-1</sup> )	-114

表3 大气湍流参数

Table 3 Atmospheric turbulence parameters

Parameter	$C_n^2$	$\sigma_R$	$\alpha$	$\beta$	$\eta$
Weak turbulence	$2.7 \times 10^{-18}$	0.24	3.64	1.94	0.74
Strong turbulence	$1.9 \times 10^{-17}$	1.79	5.54	0.69	0.27

图2为在不同大气湍流强度及不同RF信道衰落条件下,中断概率随平均信噪比的变化规律图。在仿真中,RF链路平均信噪比与FSO链路平均信噪比均相等,RF衰落系数  $m$  值越大,信道衰减越弱。由图2可以看出:随湍流强度增大及RF信道衰落强度增强,三跳RF/FSO/RF通信链路的中断性能降低。如当平均信噪比为25 dB时,在强湍流强衰落( $m_{sr}=0.5, m_{rd}=0.5$ )条件下,端到端中断概率为  $P_{out} = 2.837 \times 10^{-1}$ ,而在弱湍流弱衰落( $m_{sr}=3, m_{rd}=3$ )条件下,中断概率增大为  $2.657 \times 10^{-4}$ ,减少了3个数量级。

设置第二跳FSO链路平均信噪比为30 dB,在不同衰落指数和大气湍流强度条件下,端到端中断概率随RF信噪比变化规律如图3所示。为简化分析,假设第一跳和第三跳RF平均信噪比相同。结果表明:随着RF平均信噪比增大,中断概率降低,但由于光链路的平均信噪比的限制,当进一步增加RF平均信噪比时,中断性能不会进一步改善。例如在弱湍流、RF链路弱衰落( $m_{sr}=m_{rd}=5$ )条件下,RF平均信噪比达到29 dB后,即使继续增加中断性能,信噪比不再提高;在RF链路更弱衰落( $m_{sr}=$

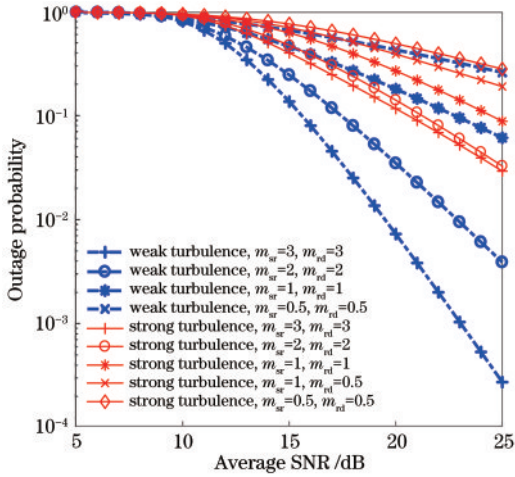


图 2 不同湍流强度及 RF 衰落条件下的中断概率  
Fig. 2 Outage probability under different turbulence intensities and RF fading conditions

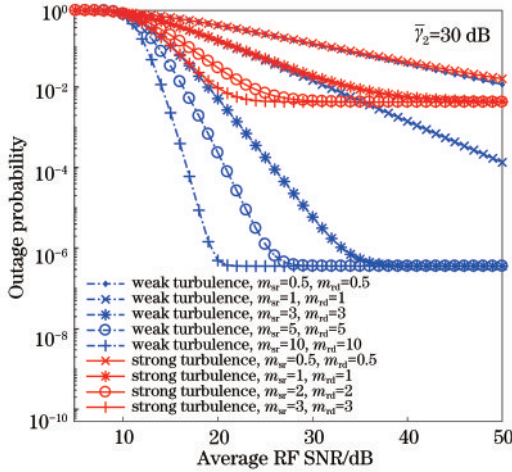


图 3 在固定 FSO 平均信噪比条件下, 中断概率随 RF 平均信噪比的变化规律

Fig. 3 Outage probability varying with the average RF SNR under a fixed FSO average SNR condition

$m_{rd}=10$ ) 条件下, RF 平均信噪比达到 23 dB 后继续增加中断性能, 信噪比不再提高; 当 RF 平均信噪比大于一定数值后再增大时, 中断概率不再提升且不受 RF 信道衰落影响, 此时链路的中断概率由光链路平均信噪比和 FSO 大气湍流强度决定; 而在 RF 链路强衰落 ( $m_{sr}=m_{rd}=0.5$ ) 时, RF 平均信噪比大于 30 dB 时继续增加, 中断性能随之改善, 因为此时还未达到最优的中断概率, RF 强衰落需要更高的 RF 链路平均信噪比才能弥补信道衰落, 此时中断概率主要受 RF 链路平均信噪比影响。

图 4 分析了在不同调制方式及两种信道衰落条件下, 三跳 RF/FSO/RF 通信系统平均误码率随平均信噪比的变化规律。假设三跳的平均信噪比相

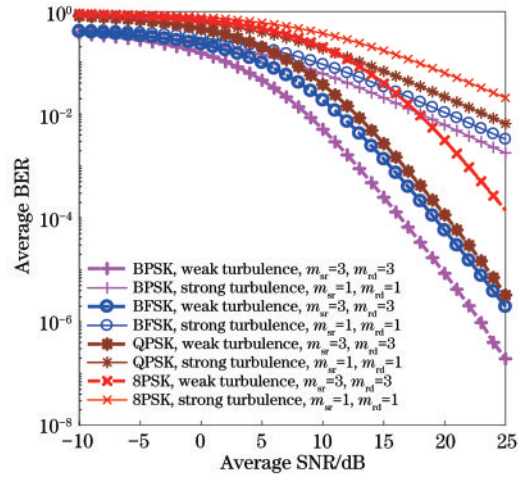


图 4 不同调制方式和不同信道衰落条件下的平均误码率  
Fig. 4 Average BER under different modulation schemes and channel fading conditions

同, 在强信道衰落 (强湍流,  $m_{sr}=m_{rd}=1$ ) 和弱信道衰落 (弱湍流,  $m_{sr}=m_{rd}=3$ ) 条件下进行数值仿真。由图 4 可知: 调制方式 BPSK 优于 BFSK 优于 QPSK 优于 8PSK, 即 BPSK 为最佳调制方式; 在低信噪比情况下, 强信道衰落的 BPSK 调制的链路误码率要低于弱信道衰落的 8PSK 调制的链路误码率。由此可见, 在平均信噪比较低时, 更应优先选择 BPSK 调制。

设置第二跳 FSO 链路的平均信噪比为 15 dB, 采用 BPSK 调制, 在不同湍流强度及 RF 衰落下, 三跳混合 RF/FSO/RF 通信链路平均误码率随 RF 平均信噪比的变化规律如图 5 所示。由图 5 可知: 在低 RF 平均信噪比时, 随着 RF 平均信噪比的提升, 链路平均误码率下降; 当 RF 平均信噪比大于一定数值再增大时, 误码率不再提升且不受 RF 信道衰落影响, 此时链路的误码率由光链路平均信噪比和 FSO 大气湍流强度决定。

图 6 分析了在不同湍流强度及调制方式下, 链路平均误码率随 RF 平均信噪比的变化规律。设置第二跳 FSO 的平均信噪比为 15 dB, 在固定 RF 衰减 ( $m_{sr}=m_{rd}=2$ ) 条件下进行数值仿真。由图 6 可知: 同湍流强度下, BPSK 调制最优。在 FSO 平均信噪比固定为 15 dB 情况下, RF 平均信噪比大于 35 dB 后再进一步提升, 误码率不变, 这是由于采用的中继协议为解码转发方式,  $\gamma_{eq} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ , 端到端的等价瞬时信噪比由三跳中最低的瞬时信噪比决定, 而每跳接收端的瞬时信噪比又由其平均信噪比及信道衰落影响共同决定, 因而端到端的最优误码性能取决于平均信噪比低且信道衰落强的一跳。

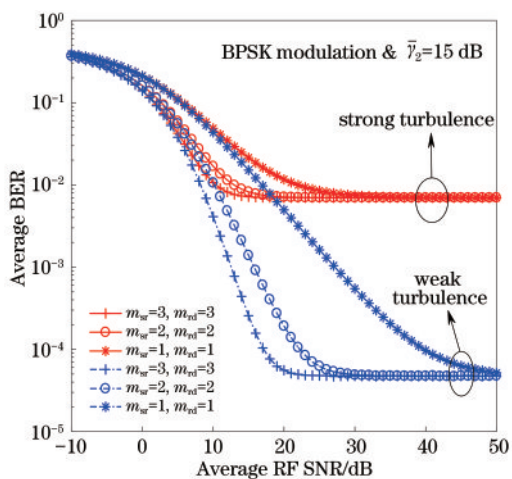


图 5 不同湍流强度及 RF 衰落条件下的平均误码率  
Fig. 5 Average BER under different turbulence intensities and RF fading conditions

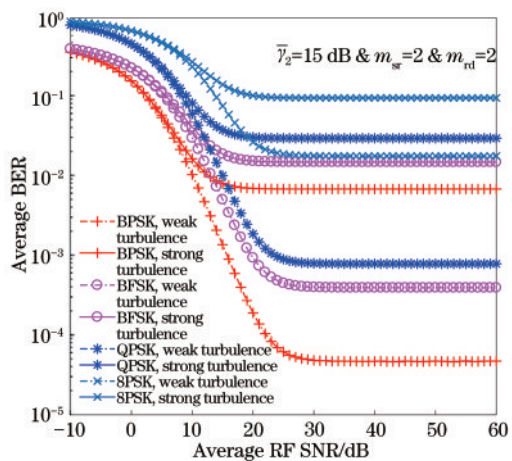


图 6 不同调制方式及湍流强度下的平均误码率  
Fig. 6 Average BER under different modulation schemes and turbulence intensities

## 5 结 论

针对解码转发下的三跳 RF/FSO/RF 航空通信链路性能开展研究。基于 Exponentiated Weibull 大气湍流分布模型及 Nakagami- $m$  衰落信道模型, 推导了混合 RF/FSO/RF 的端到端瞬时信噪比的累积分布函数表达式, 得到了中断概率和平均误码率的闭合表达式, 并进行分析。结果表明, 在三跳解码转发中继方式下, 最优的中断、误码性能更多取决于平均信噪比低且信道条件最差的一跳, BPSK 调制误码性能优于 BFSK 及高阶 PSK 调制, 推导的闭合表达式有利于系统量化分析。下一步将对多个子节点同时接入同一骨干节点时 RF 信号同频干扰影响和应用 FSO 多孔径接收分集技术展开研究。

## 参 考 文 献

- [1] Schnell M, Epple U, Shutin D, et al. LDACS: future aeronautical communications for air-traffic management [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 104-110.
- [2] Yanmaz E, Kuschnig R, Bettstetter C. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility [C]//2013 Proceedings IEEE INFOCOM, April 14-19, 2013, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2013: 120-124.
- [3] Zhang Y, Wang X, Zhao S H. Performance analysis of  $2 \times 2$  relay-assisted mixed radio frequency/ free space optical airborne communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0301003. 张韵, 王翔, 赵尚弘.  $2 \times 2$  中继混合射频/自由空间光航空通信系统性能分析[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0301003.
- [4] Ding L, Wu Z Y, Gu Y C, et al. Key technologies of wireless laser and radio frequency complementary communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060004. 丁良, 吴志勇, 谷雨聪, 等. 无线激光与射频互补通信系统的关键技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060004.
- [5] Li X Y, Zhang P, Tong S F. Bit error rate performance of free space optical communication system based on differential detection with zero decision threshold under Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106001. 李晓燕, 张鹏, 佟首峰. Gamma-Gamma 大气湍流下零判决门限差分探测自由空间光通信系统误码率性能 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, et al. Performance analysis for mixed FSO/RF Nakagami- $m$  and Exponentiated Weibull dual-hop airborne systems

- [J]. Optics Communications, 2017, 392: 294-299.
- [9] Varshney N, Jagannatham A K, Varshney P K. Cognitive MIMO-RF/FSO cooperative relay communication with mobile nodes and imperfect channel state information[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4(3): 544-555.
- [10] 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.
- [11] Han L Q, Jiang H B. Outage probability analysis of a mixed cognitive RF and MIMO FSO system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0406001. 韩立强, 江红兵. 一种混合认知 RF 和 MIMO FSO 系统的中断概率分析[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0406001.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Najafi M, Ardebilipour M, Soleimani-Nasab E, et al. Multi-hop cooperative communication technique for cognitive DF and AF relay networks [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 83(4): 3209-3221.
- [15] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13055-13064.
- [16] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 13-20.
- [17] Wang Z, Shi W X, Liu W. Performance analysis of mixed RF/FSO system with spatial diversity [J]. Optics Communications, 2019, 443: 230-237.
- [18] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Norms[M]//Table of integrals, series, and products. Amsterdam: Elsevier, 1980: 1114-1125.
- [19] Karagiannidis G K, Sagias N C, Tsiftsis T A. Closed-form statistics for the sum of squared Nakagami- $m$  variates and its applications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(8): 1353-1359.
- [20] ResearchWolfram. The mathematical functions site [EB/OL]. (2001-10-29) [2020-07-20]. <http://functions.wolfram.com>.