

三点协作架构下混合 RF/FSO 航空通信系统性能分析

刘文亚*, 王翔, 赵尚弘, 牟迪

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 研究一种基于选择合并分集三点协作架构下的混合射频/自由空间光(RF/FSO)航空通信系统链路性能。在该架构下,FSO 链路服从平均孔径效应下的 Exponentiated Weibull 大气湍流分布模型,RF 链路采用 Nakagami- m 衰落信道模型,推导了系统端到端性能指标的闭合表达式,通过仿真分析湍流强度、调制方式及分集通信方案对系统中断概率(OP)、平均误码率(BER)的影响。仿真结果表明:相比单 FSO 链路通信,混合 RF/FSO 航空通信具有更好的 BER 及 OP 性能;低阶 M -PSK 调制能有效改善大气湍流对混合 RF/FSO 航空通信系统的影响;在信噪比高时,合并分集的通信方案对系统误码性能的改善要优于低阶调制。

关键词 光通信; RF/FSO 通信系统; 协作通信; 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/LOP57.210605

Analysis of Hybrid RF/FSO Airborne Communication System Performance Under Three-Node Cooperative Architecture

Liu Wenya*, Wang Xiang, Zhao Shanghong, Mu Di

Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract Link performance of a hybrid radio frequency/free-space optical (RF/FSO) airborne communication system using the three-node cooperative architecture based on selection combination diversity is analyzed in this study. Using this architecture, FSO and RF links are simulated using the Exponentiated Weibull atmospheric turbulence distribution model under the mean aperture effect and Nakagami- m fading channel model, respectively. Closed form expressions for end-to-end performance indicators of this hybrid system are derived. The effects of turbulence intensities, modulation modes, and diversity communication schemes on the outage probability (OP) and average bit error rate (BER) are analyzed using a simulation. The simulation results show that the hybrid RF/FSO airborne communication exhibits better BER and OP performances than the single FSO link system. Moreover, it is observed that low-order M -PSK modulation can effectively improve the impact of atmospheric turbulence on hybrid RF/FSO airborne communication system. When signal-to-noise ratio is high, the cooperative diversity communication scheme improves the BER performance of the system better than the low-order modulation scheme.

Key words optical communications; RF/FSO communication system; cooperative communication; 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

在航空通信中,射频(RF)通信基本满足导航、

话音等业务的需求,但因 RF 通信的带宽受限和受同频干扰的影响,不易满足高速率传输业务的需求^[1-2]。自由空间光(FSO)通信因具有宽带宽、天线

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(91638101)

* E-mail: kyllinlwy@163.com

尺寸小、功耗低、保密性好、抗干扰能力强及部署成本低等优点而备受关注,是实现未来航空通信大容量、抗干扰传输的重要手段之一^[3-4]。然而,FSO通信光束易受沙尘暴、大雾等恶劣天气影响,即使在晴朗的天气下,也易受大气湍流的影响^[5]。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^[6]。因此,综合考虑环境对FSO及RF信道的不同影响,将两者混合应用来减轻信道的衰落,从而实现高速、可靠、稳定、抗干扰的混合RF/FSO航空通信系统。

目前,关于双链路混合RF/FSO通信系统架构的研究主要分为串行部署(中继方式)和并行部署两个方面^[7-15]。在串行的RF/FSO链路部署方面,主要研究不同信道模型和不同中继协议下系统的性能^[7-9];在并行的RF/FSO链路部署方面,主要研究分集接收方案和链路软、硬切换两个内容^[10-15]。在RF通信系统中,串行结构与并行结构的不同组合就组成了经典的协作通信架构,协作通信能够有效抑制信道衰落并提供分集增益,提高了端到端链路和网络的性能^[16]。在无线协作通信中,基本中继协作的方式有放大转发(AF)、解码转发(DF)及编码协作(CC)等^[17]。文献[18]基于Nakagami- m 和Gamma-Gamma信道模型分析了两种不同的三点协作分集架构下混合FSO/RF通信系统的性能,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,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^[19-20]提出Exponentiated Weibull分布模型,并通过实验验证该模型适用于弱到强湍流和平均孔径条件下的大气湍流信道。

本文研究一种在三点协作架构下的混合RF/FSO航空通信系统性能。其中,FSO链路采用Exponentiated Weibull分布模型,RF信道衰落服从Nakagami- m 分布,中继节点采用DF协议。利用Meijer G函数推导出混合RF/FSO航空通信系统的中断概率和平均误码率(BER)闭合表达式,通过闭合表达式进行仿真,对比分析湍流强度、调制方式及分集协作通信方案对系统中断概率、误码性能的影响。

2 系统及信道模型

三点协作架构下的混合RF/FSO航空通信系统模型如图1所示,其中,S、D均为航空平台骨干节

点,R为航空平台子节点。中继节点R辅助源节点向目的节点传输信息,中继点采用DF协议,发射端到中继端(S-R)和中继端到接收端(R-D)采用RF通信,发射端到接收端(S-D)直传链路采用激光通信。在发射端,系统采用M-PSK调制,调制信号输入到S-R-D和S-D两个子系统并同时传输,在目的节点处进行检测并运用选择合并(SC)分集技术进行处理。

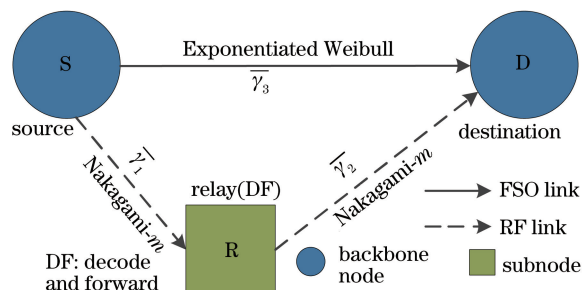


图1 三点协作架构下的混合RF/FSO系统
Fig. 1 Hybrid RF/FSO system under three-node cooperative architecture

2.1 FSO链路

在FSO链路终端,采用强度调制/直接检测(IM/DD),将直流偏压加到M-PSK调制信号上,以避免对光载波强度进行调制的信号出现负值。在FSO系统的接收端,光电探测器通过直接检测将入射光信号转换为电信号。FSO子系统接收端信号 y_{FSO} 可以表示为

$$y_{\text{FSO}} = RI_{\text{FSO}}x + n_{\text{FSO}}, \quad (1)$$

式中: I_{FSO} 为大气湍流引起的信道衰落增益; x 为M-PSK调制信号; R 为光电转换效率; n_{FSO} 为加性高斯白噪声信号。

FSO子系统接收端采用大孔径接收技术,考虑孔径平均效应,激光链路服从Exponentiated Weibull分布,则信噪比(SNR) γ_{FSO} 的概率密度函数(PDF)^[20-21]表示为

$$f_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma) = \frac{\alpha\beta}{2\gamma_{\text{FSO}}\eta^\beta} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^{\beta-2} \exp \left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \right] \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \right] \right\}^{\alpha-1}, \quad (2)$$

式中: α, β 及 η 均为与大气湍流强度和湍流尺度有关的参数, $\alpha > 0, \beta > 0, \eta > 0$ ^[19]; $\bar{\gamma}_{\text{FSO}}$ 为激光链路的平均信噪比。FSO链路信噪比 γ_{FSO} 的累积分布函数(CDF)^[20-21]表示为

$$F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma) = \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \right] \right\}^\alpha. \quad (3)$$

2.2 RF 链路

在 RF 子系统发射端,对信号进行上变频处理,在 RF 子系统接收端,RF 信号通过下变频解调成原始信号。RF 接收端信号 y_{RF} 可以表示为

$$y_{\text{RF}} = h_{\text{RF}}x + n_{\text{RF}}, \quad (4)$$

式中: h_{RF} 为信道的衰落因子; n_{RF} 为加性高斯白噪声信号。

RF 链路服从 Nakagami- m 分布,信噪比的概率密度函数表达式^[15,21]为

$$f_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m) \gamma_{\text{RF}}^m} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma_{\text{RF}}}\right), \quad (5)$$

式中: m 为 Nakagami- m 信道衰落指数, m 值越大,信道衰落越弱; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; γ_{RF} 为射频链路的平

均信噪比。RF 链路信噪比 γ_{RF} 的 CDF^[15,21] 表示为

$$F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \gamma\left(m, \frac{m\gamma}{\gamma_{\text{RF}}}\right), \quad (6)$$

式中: $\gamma(\cdot)$ 为不完全伽马函数。

3 信噪比模型

假设 S-R、R-D、S-D 链路的瞬时信噪比分别为 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 , 平均信噪比分别为 $\overline{\gamma_1}$ 、 $\overline{\gamma_2}$ 、 $\overline{\gamma_3}$, 其中 $\overline{\gamma_3}$ 为激光链路平均信噪比。对于 S-R-D 链路, 中继点采用 DF 协议, 则中继链路端到端等价信噪比^[9]为

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

中继链路端到端等价信噪比 γ_{eq} 的 CDF 为

$$F_{\gamma_{\text{eq}}}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\gamma_1}\right) + \frac{1}{\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma}{\gamma_2}\right) - \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\gamma_1}\right) \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma}{\gamma_2}\right). \quad (8)$$

接收端采用 SC 分集技术, SC 分集是一种较为简单、直接的组合方案。在接收端测量每一条链路的电信噪比, 并选择电信噪比最高的信号作为输出。

因而, 输出信号的信噪比^[14]为

$$\gamma_{\text{co}} = \max(\gamma_3, \gamma_{\text{eq}}). \quad (9)$$

则协作分集下接收端瞬时信噪比 γ_{co} 的 CDF 为

$$F_{\gamma_{\text{co}}}(\gamma) = F_{\gamma_{\text{eq}}}(\gamma)F_{\gamma_3}(\gamma) = [F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma)]F_{\gamma_3}(\gamma) = \left\{ \frac{1}{\Gamma(m_1)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\gamma_1}\right) + \frac{1}{\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma}{\gamma_2}\right) - \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma}{\gamma_1}\right) \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma}{\gamma_2}\right) \right\} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_3}}\right)^\beta\right] \right\}^a. \quad (10)$$

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, 可表示为接受端信号的信噪比低于某个信噪比阈值 γ_{th} 的概率。因此, 系统中断概率的数学表达式为

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = P(\gamma < \gamma_{\text{th}}) = F(\gamma_{\text{th}}). \quad (11)$$

3.1.1 单 FSO 通信

仅采用一条激光链路进行通信时, 系统中断概

率的数学表达式为

$$P_{\text{FSO-out}}(\gamma_{\text{th}}) = P(\gamma < \gamma_{\text{th}}) = F_{\gamma_3}(\gamma_{\text{th}}) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_3}}\right)^\beta\right] \right\}^a. \quad (12)$$

3.1.2 三点协作架构下的混合 RF/FSO 系统

对三点协作架构下的 RF/FSO 通信系统来说, 系统中断概率的表达式为

$$P_{\text{co-out}}(\gamma_{\text{th}}) = P(\gamma < \gamma_{\text{th}}) = F_{\gamma}(\gamma_{\text{th}}) = [F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma)]F_{\gamma_3}(\gamma) = \left\{ \frac{1}{\Gamma(m_1)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma_{\text{th}}}{\gamma_1}\right) + \frac{1}{\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma_{\text{th}}}{\gamma_2}\right) - \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \gamma\left(m_1, \frac{m_1\gamma_{\text{th}}}{\gamma_1}\right) \gamma\left(m_2, \frac{m_2\gamma_{\text{th}}}{\gamma_2}\right) \right\} \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_3}}\right)^\beta\right] \right\}^a. \quad (13)$$

3.2 平均误码率

平均误码率亦是评价系统性能的指标之一。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。

对于 M -PSK 调制,瞬时误码率的表达式^[14-15]可以写成

$$\begin{cases} P_e(\gamma) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}), M = 2 \\ P_e(\gamma) \approx \frac{1}{\log_2 M} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\gamma} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right], M \geq 4 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数; M 为调制阶数。

对(14)式进行求导,可得到瞬时误码率的一阶导数表达式,即

$$\begin{cases} P_e'(\gamma) = -\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \gamma^{-1/2} \exp(-\gamma), M = 2 \\ P_e'(\gamma) \approx -\frac{1}{\log_2 M \sqrt{\pi}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \gamma^{-1/2} \exp \left[-\gamma \sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right) \right], M \geq 4 \end{cases}. \quad (15)$$

系统的平均误码率^[14,21]为

$$\overline{P_e}(\gamma) = \int_0^\infty P_e(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma. \quad (16)$$

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(16)式,可得

$$\overline{P_e}(\gamma) = -\int_0^\infty F_\gamma(\gamma) P_e'(\gamma) d\gamma. \quad (17)$$

3.2.1 单 FSO 通信

根据牛顿广义二项式定理,可将(3)式展开为

$$\sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times$$

$\left\{ \exp \left[-i \left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \right] \right\}$, 其中, i 为整数。利用 Meijer G 函数^[22]的性质,将指数项 $\exp \left[-i \left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \right]$ 写为 Meijer G 函数形式 $G_{0,1}^{1,0} \left[i \left(\frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{\text{FSO}}}} \right)^\beta \middle| - \right]_0$ 。对(3)式进行如上处理,将其联合(15)式代入(17)式中,根据 Meijer G 函数^[22]的积分性质进行化简,可得单激光链路通信的平均误码率,表达式为

$$\begin{cases} \overline{P_e}(\gamma) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times \\ \frac{k^{1/2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} G_{l,k}^{k,l} \left[\left(\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_{\text{FSO}}})} \right)^\beta \times (l)^l \middle| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right], M = 2 \\ \overline{P_e}(\gamma) \approx \frac{1}{(\log_2 M)\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times \\ \frac{k^{1/2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} G_{l,k}^{k,l} \left[\left[\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_{\text{FSO}}})} \right]^\beta \times \left[\frac{l}{\sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \right)} \right]^l \middle| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right], M \geq 4 \end{cases}, \quad (18)$$

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 $\gcd(l, k) = 1, \gcd(\cdot)$ 为最大公约数函数形式。

3.2.2 基于三点协作通信的混合 RF/FSO 系统

依据不完全伽马函数展开式 $\gamma(m, x) = (m -$

$1)! \times \left(1 - e^{-x} \sum_{j=0}^{m-1} \frac{x^j}{j!} \right)$ ^[23],对(10)式中的不完全伽马函数进行展开,将处理后的(10)式联合(15)式代入(17)式中,根据牛顿广义二项式定理和 Meijer G 函数的运算性质^[22],得到三点协作架构下混合 RF/FSO 通信系统的平均误码率表达式为

$$\begin{aligned}
 \overline{P_e}(\gamma) &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times \frac{k^{1/2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} G_{l,k}^{k,l} \left\{ \left[\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_3})^\beta} \right]^k \times \right. \\
 &\quad \left. (l)^i \left| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right\} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \times \sum_{r_1=0}^{m_1-1} \sum_{r_2=0}^{m_2-1} \frac{1}{r_1! r_2!} \left(\frac{m_1}{\gamma_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_2}{\gamma_2}\right)^{r_2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times \\
 &\quad (-1)^i \times \frac{k^{1/2} l^{r_1+r_2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} \left(\frac{m_1}{\gamma_1} + \frac{m_2}{\gamma_2} + 1\right)^{-(l/2+r_1+r_2)} \times \\
 &\quad G_{l,k}^{k,l} \left\{ \left[\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_3})^\beta} \right]^k \times \left(\frac{\overline{\gamma_1 \gamma_2 l}}{m_2 \gamma_1 + m_1 \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2} \right)^l \left| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2 - r_1 - r_2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right\}, M=2 \\
 \overline{P_e}(\gamma) &\approx \frac{1}{(\log_2 M)\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times \\
 &\quad \frac{k^{1/2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} G_{l,k}^{k,l} \left\{ \left[\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_3})^\beta} \right]^k \times \left[\frac{l}{\sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)} \right]^l \left| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right\} - \frac{\sin\frac{\pi}{M}}{(\log_2 M)\sqrt{\pi}} \times \\
 &\quad \sum_{r_1=0}^{m_1-1} \sum_{r_2=0}^{m_2-1} \frac{1}{r_1! r_2!} \left(\frac{m_1}{\gamma_1}\right)^{r_1} \left(\frac{m_2}{\gamma_2}\right)^{r_2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(i+1)\Gamma(\alpha-i+1)} \times (-1)^i \times \\
 &\quad \frac{k^{1/2} l^{r_1+r_2}}{(2\pi)^{(l+k)/2-1}} \left[\frac{m_1}{\gamma_1} + \frac{m_2}{\gamma_2} + \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right) \right]^{-(l/2+r_1+r_2)} \times \\
 &\quad G_{l,k}^{k,l} \left\{ \left[\frac{i}{k(\eta\sqrt{\gamma_3})^\beta} \right]^k \times \left[\frac{\overline{\gamma_1 \gamma_2 l}}{m_2 \gamma_1 + m_1 \gamma_2 + \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)\gamma_1 \gamma_2} \right]^l \left| \begin{matrix} \Delta(l, 1/2 - r_1 - r_2) \\ \Delta(k, 0) \end{matrix} \right\}, M \geq 4
 \end{aligned} \tag{19}$$

4 系统性能分析

根据中断概率的闭合表达式(12)、(13)式及平均误码率的闭合表达式(18)、(19)式,分析不同情景下单激光链路及混合 RF/FSO 航空通信系统链路性能。表 1 和表 2 列出了仿真参数。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Link distance L /km	100
Laser wavelength λ /nm	1550
Optical-to-electrical conversion efficiency R	1
Receiver diameter D /mm	200
Bandwidth B /MHz	250
RF link distance(S-R) L_1 /km	70
RF link distance(R-D) L_2 /km	70
RF carrier frequency f /GHz	60
Noise power spectral density N /(dBm · MHz ⁻¹)	-114

在数值仿真中,对于(18)、(19)式中的无穷级数形式,在仿真时设置 $i=30$,此时平均误码率表达式可基本收敛。假设系统的中断信噪比阈值 $\gamma_{th} =$

10 dB,RF 链路平均信噪比与 FSO 链路平均信噪比均相等。为了简化仿真,两跳 RF 信道衰落指数 m 取值相同。

表 2 大气湍流参数

Table 2 Atmospheric turbulence parameters

Situation	C_n^2	σ_R^2	α	β	η
Weak turbulence	2.7×10^{-18}	0.24	3.64	1.94	0.74
Strong turbulence	1.9×10^{-17}	1.79	5.54	0.69	0.27

图 2 为在不同通信方案及不同信道衰落条件下中断概率随平均信噪比的变化规律图。大气湍流信道参数如表 2 所示,其中, C_n^2 为大气结构常数, σ_R^2 为 Rytov 指数,RF 链路衰落指数 $m=1,2,3$ 分别对应强,中,弱衰落。由图 2 可以看出,随湍流强度增大及 RF 信道衰落强度增强,协作 RF/FSO 通信系统中断性能降低。当平均信噪比为 22 dB,两条 RF 链路为弱衰落($m_1=3, m_2=3$)时,弱湍流条件下系统中断概率为 $P_{out} = 7.143 \times 10^{-7}$,而强湍流条件下中断概率增大到 1.313×10^{-4} ,增加了 3 个数量级。协作 RF/FSO 通信系统链路要比单一 FSO 链路更加稳定,中断性能更好,如在强湍流、RF 链路为弱

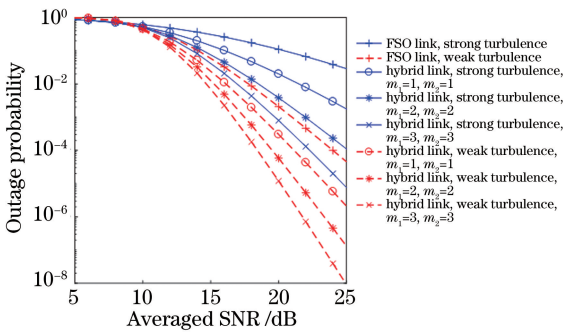


图2 不同通信方案和信道衰落条件下的中断概率变化规律

Fig. 2 Variation law of outage probability under different communication schemes and channel fading condition

衰落($m_1=3, m_2=3$)情况下,当链路平均信噪比为20 dB时,协作 RF/FSO 通信系统的中断概率为 $P_{out}=1.204 \times 10^{-5}$,而单 FSO 链路的中断概率为 2.085×10^{-3} 。

协作 RF/FSO 通信系统采用二进制相移键控(BPSK)调制,不同衰落指数和大气湍流强度条件下系统平均误码率性能随平均信噪比变化规律如图3所示。仿真结果表明,随着湍流强度增大及 RF 信道衰减程度增强,系统平均误码率不断增大。当 FSO 直传链路和 RF 中继链路中任何一种链路信道的质量较好时,都可以改善系统误码率,如当平均信噪比为 15 dB,在强湍流及 RF 链路为弱衰减($m_1=3, m_2=3$)时,系统误码率为 3.69×10^{-5} ,在弱湍流及 RF 链路为强衰减($m_1=1, m_2=1$)时,系统误码率为 5.783×10^{-5} ,相比于强湍流及强 RF 衰减时的误码率要低 1 个数量级。

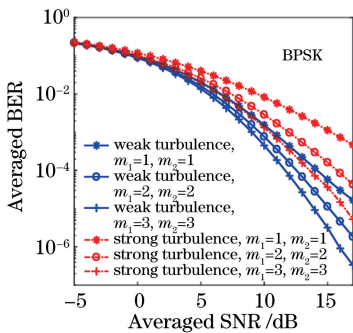


图3 不同衰落指数及湍流强度条件下的平均误码率变化规律

Fig. 3 Variation law of average BER under condition of different fading index and turbulence intensity

图4 仿真了在不同调制方式和不同湍流强度下,三点协作架构下的混合 RF/FSO 通信系统的平

均误码率随平均信噪比的变化规律。在 RF 链路为弱衰落($m_1=3, m_2=3$)条件下进行仿真。由图4可知:在 BPSK 调制下的系统性能优于正交相移键控(QPSK)调制下的, QPSK 调制下的系统性能优于 8PSK 调制下的;在 RF 链路为弱衰落的情况下,湍流强度对系统误码性能的影响要小于 M-PSK 调制阶数对系统误码性能的影响。如,当平均信噪比为 15 dB 时,强湍流下采用 BPSK 调制,系统平均误码率为 3.69×10^{-5} ,要小于弱湍流下采用 QPSK 调制时的系统平均误码率 7.314×10^{-5} ;强湍流下采用 QPSK 调制,系统平均误码率为 3.333×10^{-4} ,小于弱湍流下采用 8PSK 时的系统平均误码率 3.561×10^{-3} 。

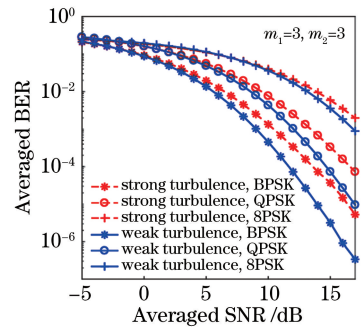


图4 不同调制方式及湍流强度下的平均误码率变化规律
Fig. 4 Variation law of average BER under different modulation modes and turbulence intensity

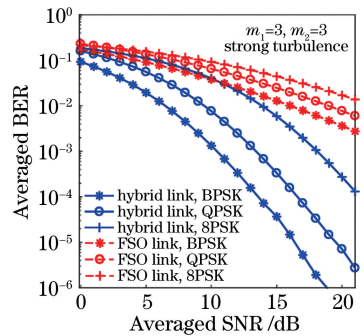


图5 不同通信方案及调制方式下的平均误码率变化规律
Fig. 5 Variation law of average BER under different communication schemes and modulation modes

在不同通信系统方案和调制方式下,平均误码率随平均信噪比的变化规律如图5所示。在强湍流及 RF 链路为弱衰减($m_1=3, m_2=3$)的条件下进行仿真。由图5可知,在相同的调制阶数下,混合 RF/FSO 通信系统的误码性能要好于单 FSO 系统。如,在采取 BPSK 调制及平均信噪比为 17 dB 时,单 FSO 系统的平均误码率为 7.942×10^{-3} ,而混合 RF/FSO 通信系统的平均误码率为 5.285×10^{-6} 。

当平均信噪比为 20 dB 时,采用 8PSK 调制的混合 RF/FSO 通信系统的平均误码率要低于采用 BPSK 调制的单 FSO 链路通信的平均误码率。这在一定程度上说明当信噪比较高时,协作 RF/FSO 传输、分集接收的通信方案相比低阶调制,能更好地改善误码性能。

5 结 论

针对三点协作架构下的混合 RF/FSO 航空通信系统、链路性能开展研究。基于 Exponentiated Weibull 大气湍流分布模型和 Nakagami- m 衰落信道模型,利用 Meijer G 函数性质推导得到了系统的中断概率和平均误码率的闭合表达式,并进行仿真分析。仿真结果表明,协作分集通信方式和低阶调制均能有效提高通信性能。信噪比高时,协作分集架构下的通信方案对系统误码性能的改善要优于低阶调制下的。在航空通信系统设计中,可优先考虑协作通信传输方案,再考虑调制方式。推导的性能指标闭合表达式对混合激光/射频航空通信系统的设计具有重要意义。

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, 2013: 120-124.
- [3] Liu H J. Overview of US military airborne RF and FSO hybrid communication[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(12): 1711-1716.
刘红军. 美军机载射频与 FSO 混合通信发展述评[J]. 电讯技术, 2014, 54(12): 1711-1716.
- [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] Son I K, Mao S W. A survey of free space optical networks[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 67-77.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Zedini E, Soury H, Alouini M. On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/RF systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3679-3689.
- [9] 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.
- [10] Rakia T, Yang H C, Alouini M, et al. Outage analysis of practical FSO/RF hybrid system with adaptive combining [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1366-1369.
- [11] Shrivastava S K, Sengar S, Singh S P. A new switching scheme for hybrid FSO/RF communication in the presence of strong atmospheric turbulence[J]. Photonic Network Communications, 2019, 37(1): 53-62.
- [12] Khan M N, Jamil M, Hussain M. Adaptation of hybrid FSO/RF communication system using puncturing technique[J]. Radioengineering, 2016, 25(4): 644-651.
- [13] Shao J H, Su R M, Yao L, et al. Performance analysis of soft-switching hybrid FSO/RF links using hybrid coding and modulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(5): 682-687.
邵军虎, 苏润民, 姚柳, 等. 软切换 FSO/RF 链路混合编码调制算法性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 682-687.
- [14] Shakir W M R. Performance evaluation of a selection combining scheme for the hybrid FSO/RF system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-10.
- [15] Liang H D, Gao C, Li Y M, et al. Analysis of selection combining scheme for hybrid FSO/RF transmission considering misalignment [J]. Optics

- Communications, 2019, 435: 399-404.
- [16] 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.
- [17] Chen L, Carrasco R A, Ganepola V, et al. Comparative investigation of coded cooperative communication systems[C]//2008 6th International Symposium on Communication Systems, July 25-25, 2008, Graz, Austria. New York: IEEE, 2008: 58-62.
- [18] Althunibat S, Badarneh O S, Mesleh R, et al. A hybrid free space optical-millimeter wave cooperative system [J]. *Optics Communications*, 2019, 453: 124400.
- [19] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13055-13064.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Wolfram. The wolfram functions site [EB/OL]. [2019-12-22]. <http://functions.wolfram.com>.
- [23] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of integrals, series, and products [M]. New York: Academic Press, 2014.