



研究与开发

## 基于混合光电传输的无人机中继通信系统性能分析

徐溯, 张际, 刁杨华, 刘元莹, 张懿

(国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 江苏 镇江 212002)

**摘要:** 针对基于光电混合架构的无人机中继通信系统下行链路多用户传输场景, 提出了一种基于统计信道状态信息的波束成形方案, 并进一步分析了系统的中断概率。在该混合架构中, 基站—无人机链路和无人机—用户链路采用自由空间光技术和射频传输完成通信过程。在已知 RF 链路统计信道状态信息的情况下, 首先提出了一种波束成形方案以抑制用户间干扰, 实现所有用户同时通信, 提升了系统的频谱效率。然后, 在自由空间光链路和射频链路分别服从 Gamma-Gamma 分布和 Nakagami- $m$  分布的条件下, 推导出了系统中断概率的闭合表达式。进一步, 得到了高信噪比条件下中断概率的渐进表达式, 获得了系统的分集度。最后, 仿真结果验证了理论分析的正确性以及所提方案的优越性。

**关键词:** 波束成形; 光电混合传输; 多用户系统; 无人机中继通信

**中图分类号:** TN925

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2022072

## Performance analysis of mixed FSO-RF transmission in UAV relay communication systems

XU Su, ZHANG Ji, DIAO Yanghua, LIU Yuanying, ZHANG Yi

Zhenjiang Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Zhenjiang 212002, China

**Abstract:** A mixed free space optical (FSO)-radio frequency (RF) transmission was studied in the multiuser unmanned aerial vehicle (UAV)-aided terrestrial network. Specifically, a novel beamforming (BF) scheme was proposed based on the available statistical channel state information (CSI), and the outage performance of the considered system was analyzed. In this mixed framework, the link between the base station and the UAV employs the FSO technology, while aerial-terrestrial links use RF technology. To achieve the space division multiple access (SDMA) in RF links. First of all, the available statistical CSI was proposed, and a novel beamforming (BF) scheme was proposed to suppress the inter-user interference so that all the users can be served simultaneously. Then, based on the assumption that the FSO and RF links follow the Gamma-Gamma fading and Nakagami- $m$  fading respectively, an analytical expression was derived for the outage probability (OP) of the considered system. Furthermore, the asymptotical OP expression in high signal-to-noise ratio regime was presented to evaluate the achievable diversity order. Finally, numerical results were given to confirm the validity of our theoretical analysis and the superiority of the proposed scheme.

**Key words:** beamforming, mixed FSO-RF transmission, multiuser system, UAV relay communication



## 0 引言

随着信息社会的发展,人类对无处不在的网络覆盖以及更高通信数据速率的需求不断增加,从而推动了无线通信技术的不断发展。随着 5G 在全球范围内的不断普及,万物互联时代即将到来。5G 以及下一代无线通信网络有望通过提供高数据速率,提升拥挤区域的服务质量,降低现有网络盲点,克服目前地面基础设施存在的缺陷。无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)通信具备机动性好、成本低、易于部署等优势,被认为是实现该目标的一项有效解决方案,并广泛应用于各个场景<sup>[1]</sup>。例如,无人机作为中继扩大覆盖范围<sup>[2]</sup>,将其应用于前传和回传连接<sup>[3]</sup>,或者无人机作为基站可以有效提升网络的容量<sup>[4]</sup>,以及物联网中的数据采集<sup>[5]</sup>。互联网视频等高流量业务的暴增,使无人机信息传输量呈指数级增长,导致无人机与基站连接的前传和回传链路是无人机网络的一个主要挑战。

与射频(radio frequency, RF)无线传输相比,自由空间光(free space optical, FSO)通信凭借其通信容量大、保密性高、频谱无须授权使用等优势<sup>[6-7]</sup>,被考虑应用于无人机网络中的前传和回传链路。具体而言,无人机作为移动中继节点将 RF 链路从用户收集的大量数据通过 FSO 移动回传链路转发给基站<sup>[8]</sup>。文献[9]证实了基于无人机的通信系统的可实现性,通过低空无人机证明了端到端的长期演进技术的可行性。文献[10,11]利用基于移动回传的无人机为偏远地区提供了网络连接。FSO 链路容易受大气湍流的影响,导致系统的性能降低。为了缓解湍流天气的影响,混合 FSO-RF 传输网络被认为是有效的解决方案之一<sup>[12]</sup>。因此,混合 FSO-RF 传输网络被广泛研究<sup>[13-16]</sup>。文献[13]推导了单用户场景混合 FSO-RF 系统中中断概率的闭合表达式。文献[14]研究了多用户情况的混合 FSO-RF 网络。文献[15]采用多天线技术以

使 RF 链路实现更高的传输速率。文献[16]在文献[15]的基础上研究了在 FSO-RF 链路将无人机作为中继的多用户系统。需要指出的是,文献[13-16]中 RF 链路的瞬时信道状态信息(channel state information, CSI)是完全已知的。但是获取瞬时 CSI 不仅增加了无人机的功耗,也会不可避免地产生估计、量化、反馈时延等误差<sup>[17-18]</sup>。针对上述情况,本文研究了基于光电混合架构的无人机中继无线通信系统下行链路多用户传输场景,提出了一种基于统计 CSI 的波束成形方案。该方案在 RF 链路的统计 CSI 已知的条件下,通过对用户信道自相关矩阵进行特征值分解,采用低复杂度的迫零(zero forcing, ZF)波束成形方案,消除用户间的干扰,实现所有用户同时通信;并进一步在 FSO 链路和 RF 链路分别服从 Gamma-Gamma 分布和 Nakagami- $m$  分布的条件下,分别推导中断概率的闭合表达式和高信噪比下渐进中断概率表达式。最后,仿真验证了闭合表达式的正确性,并揭示了所提的波束成形方案对系统性能的优越性。

本文向量和矩阵分别用黑体小写字母和大写字母表示,  $(\cdot)^T$  和  $(\cdot)^H$  分别表示转置和共轭转置,  $\exp(\cdot)$  表示指数函数,  $E[\cdot]$  表示期望,  $|\cdot|$  和  $\|\cdot\|_2$  分别表示标量的绝对值和向量的欧几里得范数,  $\mathbf{I}_N$  表示  $N \times N$  单位矩阵,  $\mathcal{C}^{M \times N}$  表示  $M \times N$  维空间,  $\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$  表示均值为  $\mu$  和方差为  $\sigma^2$  的复高斯分布,  $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数,  $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$  表示 Meijer-G 函数,  $(\cdot)_n$  表示阶乘幂。

## 1 系统模型

本文研究一个无人机中继的多用户无线通信系统,系统模型如图 1 所示。其中, UAV 作为中继(R)通过 FSO 链路接收来自基站的信号,然后通过 RF 链路将信号放大后发送给  $K$  个地面用户(Us)。无人机配置  $N$  ( $N > K$ ) 元的均匀直线阵(uniform linear array, ULA),所有用户配备单根天线。

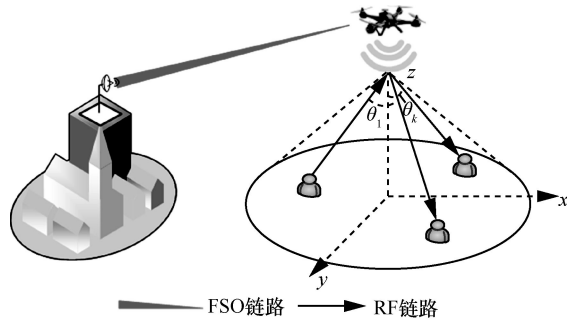


图1 系统模型

本文假设无人机中继通信以半双工的模式完成，整个通信过程分为两个阶段。

第一阶段，基站通过波分复用将多路光子载波整合到一路光载波，然后通过透镜将信号发送给无人机。经过FSO链路后，由无人机的透镜收集入射光信号并将其转换为电信号<sup>[16]</sup>。无人机输出的RF电信号 $\mathbf{y}_R(t) \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 表示为：

$$\mathbf{y}_R(t) = \sqrt{P_s} \zeta \ell_{\text{FSO}} \mathbf{g}_{\text{FSO}} \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{n}_r(t) \quad (1)$$

其中， $P_s$ 表示基站发射功率， $\zeta$ 表示光电转换系数， $\ell_{\text{FSO}}$ 表达式为 $\ell_{\text{FSO}} = \frac{1}{2}(G_t + G_r - \text{Att}_{\text{FS}} - L_{\text{lenses}} - M)$ ，单位为dB， $G_t$ 、 $G_r$ 、 $\text{Att}_{\text{FS}}$ 、 $\text{Att}_{\text{Atm}}$ 、 $L_{\text{lenses}}$ 和 $M$ 分别表示透镜发射增益、透镜接收增益、自由空间损耗、大气衰减、透镜损耗和系统余量<sup>[6]</sup>。 $\mathbf{g}_{\text{FSO}}$ 表示FSO链路的小尺度衰落系数。发射信号矢量 $\mathbf{x}_s(t) = [x_1(t), \dots, x_k(t), \dots, x_K(t)]$ ，其中， $x_k(t)$ 表示用户 $U_k$ 的信息， $\mathbf{n}_r(t) \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \sigma_r^2 \mathbf{I}_K)$ 是加性高斯白噪声（additive white Gaussian noise, AWGN）。

第二阶段，采用放大转发协议后，无人机接收的电信号乘以放大增益 $G = \frac{1}{\sqrt{P_s \zeta^2 |\ell_{\text{FSO}} \mathbf{g}_{\text{FSO}}|^2 + \sigma_r^2}}$ 后传输到用户终端。为了提升系统频谱效率，无人机采用空分多址接入技术，对第 $k$ 个用户信号的归一化波束成形权矢量为 $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。因此， $U_k (k \in \{1, 2, \dots, K\})$ 处的输出信号可以表示为：

$$\begin{aligned} y_k(t) = & G \sqrt{P_k} \ell_k \mathbf{g}_k^H \mathbf{w}_k \left( \sqrt{P_s} \zeta \ell_{\text{FSO}} \mathbf{g}_{\text{FSO}} x_k(t) + n_r(t) \right) + \\ & G \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{P_i} \ell_i \mathbf{g}_i^H \mathbf{w}_k \left( \sqrt{P_s} \zeta \ell_{\text{FSO}} \mathbf{g}_{\text{FSO}} x_i(t) + \right. \\ & \left. n_r(t) \right) + n_k(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $P_k$ 表示无人机到用户 $U_k$ 的发射功率，自由路径损耗 $\ell_k$ 可计算为 $\ell_k = \frac{1}{2}(20 \lg d_k + 20 \lg f + 92.4)$ ，单位为dB，其中， $d_k$ 是R到 $U_k$ 之间的距离， $f$ 为载波频率。RF链路的信道矢量 $\mathbf{g}_k$ 可以表示为<sup>[19]</sup>：

$$\mathbf{g}_k = \rho_k \mathbf{a}(\theta_k) \quad (3)$$

其中， $\rho_k$ 服从衰落参数为 $m_k$ 、平均功率为 $\Omega_k$ 的Nakagami- $m$ 分布的随机变量， $\theta_k$ 表示无人机到地面用户的离开角，阵列导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_k)$ 为：

$$\mathbf{a}(\theta_k) = \begin{bmatrix} 1, \exp(j \varepsilon d_e \sin \theta_k), \dots, \\ \exp(j \varepsilon (N-1) d_e \sin \theta_k) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

其中， $\varepsilon = 2\pi / \lambda$ ， $d_e$ 表示空中平台的阵列间隔。此外， $n_k(t)$ 是均值为0、方差为 $\sigma_k^2$ 的AWGN。

根据式(2)， $U_k$ 的信干噪比（signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR）可以表示为：

$$\tilde{\Lambda}_k = \frac{\gamma_{\text{FSO}} \gamma_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \gamma_{\text{FSO}} \sum_{i=1 \& i \neq k}^K \gamma_i + \sum_{i=1}^K \gamma_i + 1} \triangleq \frac{\gamma_{\text{FSO}} \tilde{\gamma}_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \tilde{\gamma}_k + 1} \quad (5)$$

其中， $\gamma_{\text{FSO}} = \bar{\gamma}_{\text{FSO}} |\mathbf{g}_{\text{FSO}}|^2$ ， $\gamma_k = \bar{\gamma}_k |\mathbf{w}_k^H \mathbf{g}_k|^2$ ，而 $\bar{\gamma}_{\text{FSO}} = \frac{P_s \zeta^2 \ell_{\text{FSO}}^2}{\sigma_r^2}$ ， $\bar{\gamma}_k = \frac{P_k \ell_k^2}{\sigma_k^2}$ ， $\tilde{\gamma}_k = \frac{\gamma_k}{\sum_{i=1 \& i \neq k}^K \gamma_i + 1}$ 。

为了实现多个用户同时通信，需要对波束成形权矢量 $\mathbf{w}_k$ 进行优化，使得式(5)中 $U_k$ 的SINR最大。在这种情况下，需要建立以下的优化问题：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}_k} \quad & \frac{\gamma_{\text{FSO}} \tilde{\gamma}_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \tilde{\gamma}_k + 1} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

很显然，该优化问题中存在 $K$ 个耦合变量



$\{\mathbf{w}_i\}_{i=1}^K$ ，从而使得问题难以求解。无人机中继的有效载荷、不可避免地估计错误和反馈时延，在 RF 链路中很难使所有用户获得完美的 CSI。因此，本文提出一种基于统计 CSI 的波束成形方案，并进一步对采用该方案的系统进行性能分析。

## 2 基于统计 CSI 的波束成形方案

本节提出了一种基于统计 CSI 的波束成形方案。首先，在已知每条 R-U 链路的统计 CSI 的条件下，优化式 (6) 问题可以重新表示为：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}_k} \quad & \mathbb{E} \left[ \frac{\gamma_{\text{FSO}} \tilde{\gamma}_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \tilde{\gamma}_k + 1} \right] \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

可以看出式 (7) 问题中的目标函数随两个独立变量  $\gamma_{\text{FSO}}$  和  $\tilde{\gamma}_k$  单调递增，因此，优化式 (7) 问题可以简化为：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}_k} \quad & \mathbb{E} [\tilde{\gamma}_k] = \mathbb{E} \left[ \frac{\bar{\gamma}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H \mathbf{w}_k}{\sum_{i=1 \& i \neq k}^K \bar{\gamma}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H \mathbf{w}_i + 1} \right] \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

由于基站—无人机链路和无人机—用户链路分别服从 Gamma-Gamma 和 Nakagami- $m$  衰落，因此，优化式 (8) 问题的目标函数的闭合表达式非常复杂。因此，通过保留期望的泰勒级数的第一项，优化式 (8) 问题中的目标函数进一步近似为：

$$\mathbb{E} \left[ \frac{\bar{\gamma}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H \mathbf{w}_k}{\sum_{i=1 \& i \neq k}^K \bar{\gamma}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H \mathbf{w}_i + 1} \right] \approx \frac{\bar{\gamma}_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{R}_k \mathbf{w}_k}{\sum_{i=1 \& i \neq k}^K \bar{\gamma}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_k \mathbf{w}_i + 1} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{R}_k$  表示  $\mathbf{g}_k$  的协方差矩阵，即  $\mathbf{R}_k \triangleq \mathbb{E} [\mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H]$ 。经过一系列数学变换，发现该优化问题仍然存在  $K$  个耦合变量  $\{\mathbf{w}_i\}_{i=1}^K$  而使问题难以求解。为了避免该耦合问题，本文通过波束成形权矢量  $\mathbf{w}_k$  消除用户之间的干扰，即  $\bar{\gamma}_i \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_k \mathbf{w}_i = 0, i \neq k$ 。因此，通过对  $\mathbf{R}_k$  进行特征值分解，得到：

$$\mathbf{R}_k \triangleq \mathbb{E} [\mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H] = \Omega_k \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}(\theta_k)^H \quad (10)$$

其中， $\Omega_k = \mathbb{E} [|\rho_k|^2]$ 。因此，优化式 (8) 问题可以重新表示为：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}_k} \quad & \mathbf{w}_k^H \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{w}_k \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{a}^H(\theta_i) \mathbf{w}_k = 0, i \neq k \\ & \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

根据投影理论知识，发射波束成形权矢量  $\mathbf{w}_k$  可以表示为：

$$\mathbf{w}_k^* = \frac{\mathbf{F}_k \mathbf{a}(\theta_k)}{\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{F}_k \mathbf{a}(\theta_k)}} \quad (12)$$

其中， $\mathbf{F}_k = \mathbf{I}_N - \mathbf{G}_d (\mathbf{G}_d^H \mathbf{G}_d)^{-1} \mathbf{G}_d^H$  表示  $\mathbf{G}_d$  的零空间投影矩阵， $\mathbf{G}_d = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{k-1}), \mathbf{a}(\theta_{k+1}), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$ 。将式 (12) 代入式 (5)， $U_k$  的 SINR 可以表示为：

$$\Lambda_k = \frac{\gamma_{\text{FSO}} \bar{\gamma}_k \left| (\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k \right|^2}{\gamma_{\text{FSO}} + \bar{\gamma}_k \left| (\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k \right|^2 + 1} = \frac{\gamma_{\text{FSO}} \gamma_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \gamma_k + 1} \quad (13)$$

需要指出的是，在现有的相关文献中，通常利用瞬时 CSI 进行波束成形方案设计。在本文中，基于统计 CSI 所提的波束成形方案能够显著降低系统的实现复杂度，降低无人机的功耗，更加适合于无人机中继无线通信系统。基于得到的权矢量  $\mathbf{w}_k^*$ ，对系统的中断概率进行进一步分析。

## 3 系统的中断概率分析

本文首先推导所提波束成形方案无人机中继通信系统的中断概率，又进一步得到高信噪比下的渐进中断概率表达式。

### 3.1 中断概率性能分析

$U_k$  的中断概率定义为  $\Lambda_k$  低于阈值  $\gamma_{\text{th}}$  的概率，因此表示为：

$$P_{\text{out},k}(\gamma_{\text{th}}) = \Pr \{ \Lambda_k \leq \gamma_{\text{th}} \} = \Pr \left\{ \frac{\gamma_{\text{FSO}} \gamma_k}{\gamma_{\text{FSO}} + \gamma_k + 1} \leq \gamma_{\text{th}} \right\} \quad (14)$$

令  $u = 1 + \gamma/\gamma_{\text{th}}$ ，式 (14) 可以表示为：

$$P_{\text{out},k}(\gamma_{\text{th}}) = 1 - \underbrace{\gamma_{\text{th}} \int_1^{\infty} \left[ 1 - F_{\gamma_k} \left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right) \right] f_{\gamma_{\text{FSO}}}(u\gamma_{\text{th}}) du}_{I_1} \quad (15)$$

为了计算式 (15) 中的  $I_1$ ，首先推导得到  $f_{\gamma_{\text{FSO}}}(x)$  的闭合表达式。与文献[13]类似，假设 FSO 链路经历 Gamma-Gamma 衰落。由于无人机的不稳定性，本文考虑指向误差的影响。因此， $\gamma_{\text{FSO}}$  的概率密度函数 (probability density function, PDF) 可以表示为：

$$f_{\gamma_{\text{FSO}}}(x) = \frac{\alpha^2 \beta^2 \tau^2}{2A_0^2 \bar{\gamma}_{\text{FSO}} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha \beta \sqrt{x}}{A_0 \sqrt{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \middle| \tau^2 - 1, \alpha - 2, \beta - 2 \right] \quad (16)$$

其中， $\tau = w_e/(2\sigma_s)$ ， $w_e$  为等效波束宽度半径， $\sigma_s$  表示接收端的抖动标准差， $A_0$  表示  $r = 0$  时收集的部分能量，其中， $r$  为孔半径。 $\alpha$  和  $\beta$  分别表示大尺度和小尺度的闪烁参数。由定理 1 给出  $\gamma_k$  的 PDF 和累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF)。

**定理 1**  $\gamma_k$  的 PDF 和 CDF 分别表示为：

$$f_{\gamma_k}(x) = \left( \frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^{m_k} \frac{x^{m_k-1}}{\Gamma(m_k)} \exp\left(-\frac{\eta_k x}{\bar{\gamma}_k}\right) \quad (17)$$

$$I_1 = \frac{\gamma_{\text{th}} \alpha^2 \beta^2 \tau^2}{2A_0^2 \bar{\gamma}_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{j=0}^{m_k-1} \left( \frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^j \frac{1}{j!} \exp\left(-\frac{\eta_k \gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}_k}\right) \times \underbrace{\int_1^{\infty} \left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)^j \exp\left(-\frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)\right) G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha \beta \sqrt{u\gamma_{\text{th}}}}{A_0 \sqrt{\bar{\gamma}_{\text{FSO}}}} \middle| \tau^2 - 1, \alpha - 2, \beta - 2 \right] du}_{I_2} \quad (21)$$

利用文献[20]中的式 (1.111) 和式 (1.211.1)，以及  $\left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)^j$  和  $\exp\left(-\frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)\right)$  可以重新表示为：

$$\left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)^j = \sum_{p=0}^j \binom{j}{p} \gamma_{\text{th}}^{j-p} (1 + \gamma_{\text{th}})^p (u - 1)^{-p} \quad (22)$$

$$F_{\gamma_k}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{\eta_k x}{\bar{\gamma}_k}\right) \sum_{j=0}^{m_k-1} \frac{1}{j!} \left( \frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^j \quad (18)$$

其中， $\eta_k = m_k/(\omega_k \Omega_k)$ ， $\omega_k = \mathbf{a}_k^H(\theta) F_k \mathbf{a}_k(\theta)$ 。

**证明：**

利用式 (3) 和式 (12)， $(\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k$  可以表示为：

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k &= \left( \frac{F_k \mathbf{a}(\theta_k)}{\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k)}} \right)^H \mathbf{g}_k \\ &= \rho_k \sqrt{\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k)} \end{aligned} \quad (19)$$

其中，已知  $\sqrt{\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k)}$  是一个常数。因此， $(\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k$  仍是一个衰落参数为  $m_k$ ，平均功率为  $\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k) \Omega_k$  的 Nakagami- $m$  随机变量。因此， $\left| (\mathbf{w}_k^*)^H \mathbf{g}_k \right|^2$  PDF 表示为：

$$\begin{aligned} f_{\left| \mathbf{w}_k^* \mathbf{g}_k \right|^2}(x) &= \left( \frac{m_k}{\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k) \Omega_k} \right)^{m_k} \\ &\frac{x^{m_k-1}}{\Gamma(m_k)} \exp\left(-\frac{m_k x}{\mathbf{a}^H(\theta_k) F_k \mathbf{a}(\theta_k) \Omega_k}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

通过变量替换，可以得到式 (17)。进一步，利用式 (17) 和文献[20]中的式 (3.351.1)， $\gamma_k$  的 CDF 表示为式 (18)。进一步，将式 (16) 和式 (18) 代入  $I_1$  中， $I_1$  可以表示为：

$$\begin{aligned} \exp\left(-\frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \left( \gamma_{\text{th}} + \frac{1 + \gamma_{\text{th}}}{u - 1} \right)\right) &= \\ \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(-\eta_k (1 + \gamma_{\text{th}}))^q}{q! ((u - 1) \bar{\gamma}_k)^q} \end{aligned} \quad (23)$$

将式 (22) 和式 (23) 代入  $I_2$  中， $I_2$  可以重新表示为：



$$I_2 = \sum_{p=0}^j \binom{j}{p} \gamma_{th}^{j-p} \sum_{q=0}^{\infty} \left( -\frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^q \frac{(1+\gamma_{th})^{p+q}}{q!} \times \underbrace{\int_1^{\infty} (u-1)^{-p-q} G_{1,3}^{3,0} \left[ \frac{\alpha\beta}{A_0} \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \left| \frac{\tau^2-1}{\tau^2-2, \alpha-2, \beta-2} \right| du \right]}_{\Xi} \quad (24)$$

根据牛顿二项式定理,  $(u-1)^{-p-q} (p+q > 0)$

可以表示为:

$$(u-1)^{-p-q} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(p+q)_n}{n!} u^{-p-q-n} \quad (25)$$

利用文献[20]中的式 (7.811.3),  $\Xi$  表示为:

$$\Xi = \begin{cases} 2G_{2,4}^{4,0} \left[ \frac{\alpha\beta}{A_0} \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \left| \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \right| \right], & p+q=0 \\ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(p+q)_n}{n!} G_{2,4}^{4,0} \left[ \frac{\alpha\beta}{A_0} \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}_{FSO}}} \left| \frac{\kappa_3}{\kappa_4} \right| \right], & p+q>0 \end{cases} \quad (26)$$

其中,  $\kappa_1 = (\tau^2 - 1, -1)$ ,  $\kappa_2 = (-2, \tau^2 - 2, \alpha - 2, \beta - 2)$ ,  $\kappa_3 = (\tau^2 - 1, 2(p+q+m) - 1)$ ,  $\kappa_4 = (2(p+q+m) - 2, \tau^2 - 2, \alpha - 2, \beta - 2)$ 。

最后,  $U_k$  的中断概率可以表示为:

$$P_{out,k}(\gamma_{th}) = 1 - \frac{\gamma_{th} \alpha^2 \beta^2 \tau^2}{2A_0^2 \bar{\gamma}_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \sum_{j=0}^{m_k-1} \left( \frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^j \frac{1}{j!} \exp \left( -\frac{\eta_k \gamma_{th}}{\bar{\gamma}_k} \right) \sum_{p=0}^j \binom{j}{p} \gamma_{th}^{j-p} \sum_{q=0}^{\infty} \left( -\frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^q \frac{(1+\gamma_{th})^{p+q} \Xi}{q!} \quad (27)$$

### 3.2 渐进性能分析

为了进一步分析系统的性能, 本节推导高信噪比下的渐进中断概率。根据文献[13]的式(29),  $U_k$  的中断概率可以表示为:

$$P_{out,k}(\gamma_{th}) = P_{\bar{\gamma}_{FSO}}(\gamma_{th}) + P_{\bar{\gamma}_k}(\gamma_{th}) - P_{\bar{\gamma}_{FSO}}(\gamma_{th}) P_{\bar{\gamma}_k}(\gamma_{th}) \approx P_{\bar{\gamma}_{FSO}}^{\infty}(\gamma_{th}) + P_{\bar{\gamma}_k}^{\infty}(\gamma_{th}) \quad (28)$$

利用文献[21]的式 (07.34.06.0006.01), 在高信噪比条件下,  $\gamma_{FSO}$  的 PDF 表示为:

$$f_{\bar{\gamma}_{FSO}}^{\infty}(\gamma_{th}) = \frac{\mu}{\bar{\gamma}_{FSO}^{v/2}} \gamma_{th}^{v/2-1} + O \left( \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{FSO}} \right)^{v/2} \right) \quad (29)$$

$$P_{\bar{\gamma}_{FSO}}^{\infty}(\gamma_{th}) = \frac{2\mu}{v \bar{\gamma}_{FSO}^{v/2}} \gamma_{th}^{v/2} + O \left( \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_{FSO}} \right)^{v/2} \right) \quad (30)$$

其中,

$$\mu = \begin{cases} \frac{\tau^2 (\alpha\beta)^v \Gamma(|\alpha-\beta|)}{2A_0^v \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) (\tau^2 - \min\{\alpha, \beta\})}, & \tau^2 > \min\{\alpha, \beta\} \\ \frac{\tau^2 (\alpha\beta)^v \Gamma(\alpha - \tau^2) \Gamma(\beta - \tau^2)}{2A_0^v \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)}, & \tau^2 < \min\{\alpha, \beta\} \end{cases},$$

$$v = \min\{\tau^2, \alpha, \beta\}.$$

与式 (29) 类似, 利用指数函数的麦克劳林级数,  $F_{\gamma_k}^{\infty}(x)$  可以重新表示为:

$$F_{\gamma_k}^{\infty}(\gamma_{th}) = \left( \frac{\eta_k}{\bar{\gamma}_k} \right)^{m_k} \frac{\gamma_{th}^{m_k}}{m_k!} + O \left( \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \right) \quad (31)$$

根据文献[22]可知, 将式 (29) 和式 (31) 代入式 (14), 可以得到高信噪比条件下系统的渐进中断概率关于分集度和编码增益的表达式, 即:

$$P_{out,k}^{\infty}(\gamma_{th}) = (G_d \bar{\gamma})^{-G_d} + O(\bar{\gamma}^{-G_d}) \quad (32)$$

其中, 分集度  $G_d$  和编码增益  $G_a$  分别表示为:

$$G_d = \min\{m_k, v/2\}, G_a = \begin{cases} \left( \frac{(\eta_k \gamma_{th})^{m_k}}{m_k!} \right)^{-1/m_k}, & v/2 > m_k \\ \left( \frac{2\mu \gamma_{th}^{v/2}}{v} \right)^{-2/v}, & v/2 < m_k \end{cases} \quad (33)$$

由式 (33) 可以看出分集度和编码增益都与 FSO 和 RF 信道参数有关。因此, 对于混合 FSO-RF 系统来说, 保证 FSO 和 RF 链路的信道质量是至关重要的。

### 4 仿真验证与分析

本节通过计算机仿真验证中断概率分析的准确性, 并进一步揭示所提波束成形方案的优越性。与文献[13]相同, 在仿真中假设伽马衰落的弱湍流衰减参数为  $\alpha=2.902$ ,  $\beta=2.51$ , 中度湍流

衰减参数为  $\alpha=2.296$ ,  $\beta=1.822$ , 指向误差影响为  $\tau=1$  和  $\tau=6.7$ 。同时, 无人机高度为 500 m, 所有用户都均匀分布在一个小区内。此外,  $P_s = P_t$ ,  $P_k = P_s/K$ ,  $d_e = \lambda/2$ 。所有 Monte Carlo 仿真均通过执行  $10^6$  次信道实现。不同用户数下中断概率随  $P_t$  的变化曲线如图 2 所示。

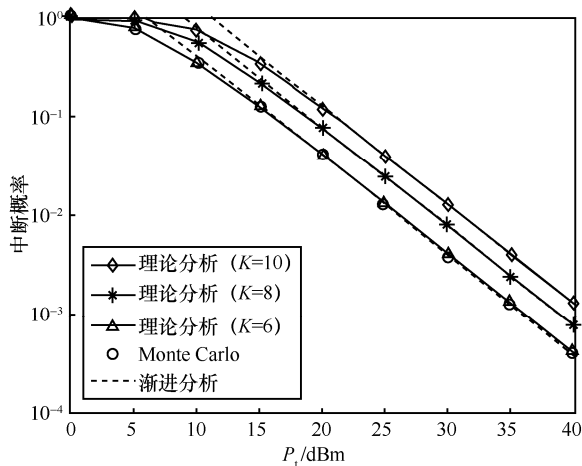


图 2 不同用户数下中断概率随  $P_t$  的变化曲线

图 2 描述在不同用户数情况下, 当 UAV 配备的天线数  $N=6$  时, 系统的中断概率随发射功率的变化曲线。可以看出, Monte Carlo 与理论分析非常吻合, 从而验证了前面推导的闭合表达式的正确性。同时, 渐进中断概率曲线在高平均信噪比下与理论分析结果比较吻合。此外, 由图 2 不难发现, 中断概率随着用户数的增加而有所下降, 这是因为用户个数越多, 需要消除的用户间干扰也越多, 系统的整体性能有所下降。

不同方案下中断概率随  $P_t$  的变化曲线的性能如图 3 所示, 给出了所提波束成形方案与传统迫零波束成形方案下系统中中断概率随发射功率的变化曲线, 其中,  $N=16$ 、 $K=6$ 。可以看出, 当大气湍流和指向误差比较严重时, 系统的中断概率会明显降低。同时, 可以看出在所提方案中无人机中继通信系统的中断概率与基于瞬时 CSI 的迫零方案系统的中断概率非常接近。

因此, 所提出的波束成形方案不仅降低了系统的实现复杂度, 在消耗功率更少的情况实现与瞬时 CSI 方案相近。

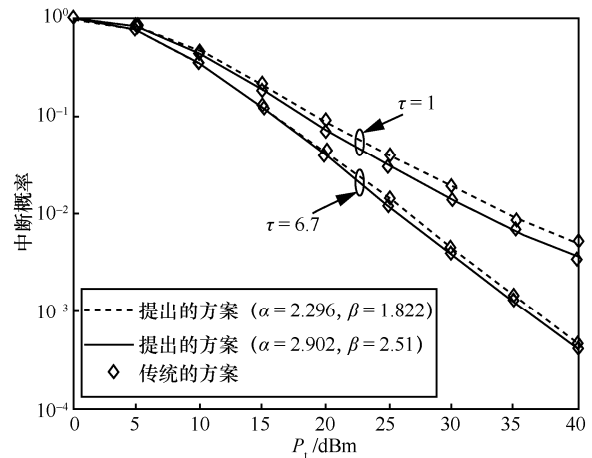


图 3 不同方案下中断概率随  $P_t$  的变化曲线的性能

## 5 结束语

本文分析了基于光电混合架构的无人机中继无线通信系统下行链路多用户传输场景的中断概率。在该混合架构中, 基站—无人机链路和无人机—用户链路分别采用 FSO 技术和 RF 传输完成通信过程。为了抑制用户间干扰, 实现所有用户同时通信, 本文在无人机可获得无人机—用户链路的统计 CSI 的条件下, 提出一种新颖的波束成形方案。基于所提的波束成形方案, 本文推导了中断概率闭合表达式。进一步, 推导了高信噪比条件下中断概率的渐进表达式, 并揭示了系统的分集度和编码增益与 FSO 和 RF 信道参数有关。最后, 仿真结果表明所提的波束成形方案在消耗功率更少的情况下实现与瞬时 CSI 方案相近的性能。

## 参考文献:

- [1] LI B, FEI Z S, ZHANG Y. UAV communications for 5G and beyond: recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2241-2263.
- [2] 淡振雷, 吴雪雯, 欧阳键, 等. 基于门限判断 DF 协议的多无人机中继传输中断性能分析[J]. 电信科学, 2020, 36(8): 103-111.



- DAN Z L, WU X W, OUYANG J, et al. Outage performance analysis for multi-UAV relay systems with threshold-based DF protocol[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 103-111.
- [3] DONG Y J, HASSAN M Z, CHENG J L, et al. An edge computing empowered radio access network with UAV-mounted FSO fronthaul and backhaul: key challenges and approaches[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 154-160.
- [4] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 65-70.
- HE Z J, AI Y, YAN S, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 65-70.
- [5] 付澍, 杨祥月, 张海君, 等. 物联网数据收集中无人机路径智能规划[J]. 通信学报, 2021, 42(2): 124-133.
- FU S, YANG X Y, ZHANG H J, et al. UAV path intelligent planning in IoT data collection[J]. Journal on Communications, 2021, 42(2): 124-133.
- [6] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [7] 曹明华, 康中杰, 武鑫, 等. 指数威布尔信道下FTN-OWC系统的信道容量分析[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1506004.
- CAO M H, KANG Z J, WU X, et al. Channel capacity analysis of FTN-OWC system under exponentiated weibull channel[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1506004.
- [8] ALZENAD M, SHAKIR M Z, YANIKOMEROGLU H, et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 218-224.
- [9] CHANDRASEKHARAN S, GOMEZ K, AL-HOURANI A, et al. Designing and implementing future aerial communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 26-34.
- [10] Aquila: what's next for high-altitude connectivity? [EB]. 2020.
- [11] NAGPAL L, SAMDANI K. Project loon: innovating the connectivity worldwide[C]//Proceedings of 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [12] TRINH P V, PHAM A T. Outage performance of dual-hop AF relaying systems with mixed MMW RF and FSO links[C]//Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [13] ZEDINI E, ANSARI I S, ALOUINI M S. Performance analysis of mixed nakagami- $m$  and gamma-gamma dual-hop FSO transmission systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-20.
- [14] SAMIMI H, UYSAL M. End-to-end performance of mixed RF/FSO transmission systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(11): 1139.
- [15] AL-ERYANI Y F, SALHAB A M, ZUMMO S A, et al. Protocol design and performance analysis of multiuser mixed RF and hybrid FSO/RF relaying with buffers[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 309.
- [16] AJAM H, NAJAFI M, JAMALI V, et al. Ergodic sum rate analysis of UAV-based relay networks with mixed RF-FSO channels[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020(1): 164-178.
- [17] KONG H C, LIN M, ZHU W P, et al. Multiuser scheduling for asymmetric FSO/RF links in satellite-UAV-terrestrial networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1235-1239.
- [18] HUANG Q Q, LIN M, WANG J B, et al. Energy efficient beamforming schemes for satellite-aerial-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6): 3863-3875.
- [19] AKHTAR A M, HOLLAND O, LE T A, et al. Cooperative cognitive radio beamforming in the presence of location errors[C]//Proceedings of 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2011.
- [20] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[EB]. 2007.
- [21] The wolfram functions site[EB]. 2020.
- [22] WANG Z D, GIANNAKIS G B. A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(8): 1389-1398.

#### [作者简介]



徐溯(1989-), 男, 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司工程师, 主要研究方向为无线通信。

张际(1975-), 男, 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司高级工程师, 主要研究方向为无线通信。

刁杨华(1989-), 男, 国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司工程师, 主要研究方向为无线通信。

刘元莹(1993-), 女, 现就职于国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 主要研究方向为无线通信。

张懿(1979-), 女, 现就职于国网江苏省电力有限公司镇江供电分公司, 主要研究方向为无线通信。