

基于 Kappa-mu/M 分布的联合多用户分集与并行中继 继选择 RF/FSO 系统性能研究

张敏惠¹, 童 杨¹, 王 怡^{1,2}

(1. 中国计量大学信息工程学院浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 浙江杭州 310018; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059)

摘 要: 本文在能够表征大多数信道条件的 Kappa-mu/M 分布混合统计模型组合下, 研究了存在同频干扰的联合多用户分集与并行中继选择射频技术/自由空间光通信系统, 分别推导出系统的中断概率的 Meijer G 解析表达式和渐近近似表达式. 通过仿真解析、渐近近似表达式, 分析了信道衰落、指向误差、同频干扰、用户选择和并行中继选择等关键因素对系统的中断性能的影响, 更进一步分析了高信噪比下的渐近结果并得出了系统的分集阶数. 为了验证解析表达式的有效性, 给出了蒙特卡罗仿真结果. 结果表明, 同频干扰的存在使得系统性能大幅下降, 多用户分集和并行中继选择可以改善受同频干扰的射频技术/自由空间光通信系统的性能. 具体来说, 多用户分集提高了射频路径的性能, 而并行中继选择提高了系统的整体性能. 系统行为由两个链路中性能最坏的一个所主导. 因此, 在工程应用中分析定位性能不足的链路并提升其性能是提升整个系统性能的关键.

关键词: 射频技术/自由空间光通信系统; 同频干扰; 多用户分集; 并行中继选择; Kappa-mu/M 分布

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)01-0026-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210087

Performance Analysis of Multiuser Diversity and Parallel Relay Selection RF/FSO System over Kappa-mu/M Distribution Channels

ZHANG Min-hui¹, TONG Yang¹, WANG Yi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In this paper, we investigate the co-channel interference(CCI) radio frequency(RF)/free space optical(FSO) system with multiuser diversity and relay selection. We use the hybrid Kappa-mu/M distribution statistical model that can represent most channels. The Meijer G analytical expressions and approximate asymptotic expressions of the outage probability are derived. The effects of key factors such as channel fading, pointing error, CCI, user selection, and parallel relay selection on the outage performance are analyzed through simulation analysis expressions and asymptotic expressions. Further analysis of the asymptotic results in the high signal-to-noise ratio(SNR) regimes gives the diversity order of the system. Monte Carlo simulation results are generated to verify the validity of the analytical expression. The results show that CCI is the main factor that decreases the system performance. Multiuser diversity and relay selection can improve the performance of RF/FSO system with CCI. Multiuser diversity improves the performance of the RF path, while relay selection improves the overall performance of the system. System behavior is dominated by the worst-performing of the two links. Therefore, locating links with insufficient performance and improving their performance is the key to improving the performance of the entire system in engineering applications.

Key words: radio frequency/free-space optical system; co-channel interference; multiuser diversity; parallel relay selection; Kappa-mu/M distribution

1 引言

随着移动终端呈指数级增长,通信系统对容量、数据速率和射频资源的需求也呈爆发增长之势.目前射频技术(Radio Frequency, RF)依旧是传统通信的首选,但射频技术也有其自身的问题,包括有限的速率、许可频谱、干扰和天气条件.自由空间光通信(Free-Space Optical, FSO)也称为大气光通信,是一种在不需光纤的情况下通过激光信号在大气信道下传播实现的双向通信系统^[1].FSO具有许可证免费、成本低和带宽高等优点,但在长距离传输时(除太空中通信外),容易受恶劣天气影响而导致通信链路中断^[2].RF/FSO系统具体指接入子网采用RF技术、主干网采用FSO技术的通信系统^[3].两种通信技术发挥各自优势,不仅可以提升通信系统整体性能,还能有效拓展通信距离.该系统的应用可以有效补充RF接入网络与光纤回传网络之间的传输链路,为未架设光纤的楼宇之间提供与光纤通信性能相近的通信链路^[4].同时,得益于FSO技术,RF/FSO系统可将大量蜂窝网络连接到移动核心网络,确保了足够的容量和服务质量,其高成本效益和强大的可扩展性完全满足5G蜂窝回程网络的要求^[5,6].近几年来,RF/FSO系统容量高、可扩展和成本低以及保密性好等优点引起了学术界的广泛关注,是一种具有广泛前景的通信模型.

到目前为止,RF/FSO系统分别在不同信道下考虑自动重传请求(Automatic Repeat-reQuest, ARQ)^[7,8]、多进多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)^[9,10]、认知无线电^[11,12]等技术对物理层安全或者系统性能的影响进行了研究.2015年Petkovic等人研究了在瑞利和Gamma-Gamma衰落信道上RF/FSO双跳并行中继系统,采用了部分放大转发(Amplify and Forward, AF)中继选择,推导出中断概率和平均误符号率的解析表达式,给出了数值结果,并通过蒙特卡罗仿真验证了结果的正确性^[13].2020年,Tonk等人研究了存在干扰的RF/FSO双向中继系统,考虑多个射频用户经历了Nakagami- m 分布衰落,FSO链路上的大气湍流遵循Double Generalized Gamma闪烁模型,研究了用户数量、指向误差、大气湍流条件和中断概率阈值等系统参数对网络整体性能的影响^[14].上述文章结果显示,多用户分集提高了系统吞吐量,显著提高了射频链路的可靠性.而在链路中采用多个并行中继可以获得的空分增益,使系统性能得到明显提升.这些结果都是分别对多用户分集或并行中继情况进行了研究而得到的,并未对这两者的联合作用进行研究.但事实上,通信网络往往有多个用户,不考虑多用户情况是不切实际的.而现有的蜂窝系统也都需要大量的中继器,并根据不同的拓扑结构和网络配置进行串联或并行部署.目前,RF/

FSO领域中有关联合考虑多用户分集与并行中继选择的文献罕见报道.

在混合RF/FSO系统中,同频干扰(Co-Channel Interference, CCI)是导致频率复用的主要因素之一.针对CCI对混合RF/FSO系统的影响,近年来有研究者提出了相应的理论分析.2018年,Balti等人推导了具有额外直接链路的混合RF/FSO系统的中断概率和误码率表达式,并考虑了中继节点处的CCI,除了中断概率和误码率之外,还对多分支系统的遍历容量性能进行了仿真^[15].目前,RF/FSO领域中在Kappa-mu/M混合衰落信道下存在CCI时联合考虑多用户分集与并行中继选择的文献尚未见报道.

基于以上分析,本文研究了存在同频干扰的联合多用户分集与并行中继选择的RF/FSO系统.其中,RF链路经历了一种通用的物理衰落模型Kappa-mu分布,其捕获的RF链路衰落统计数据更贴近实际,FSO链路服从M分布.系统考虑信道衰落、指向误差、同频干扰、用户选择和并行中继选择对系统性能的影响.首先,译码转发(Decode-and-Forward, DF)双跳网络由目标节点在多个用户和并行中继中选择最佳用户和最佳中继以最大化端到端信噪比.在得到瞬时端到端信噪比后,推导了系统的中断概率的Meijer G解析表达式和高信噪比下的渐近近似表达式.然后,仿真并分析了解析表达式与渐近近似表达式,得到了系统的分集阶数.最后,通过蒙特卡罗仿真验证了表达式的准确性.

2 系统模型

2.1 系统模型

图1所示为一个联合多用户和并行中继选择RF/FSO系统.系统包括源节点S处 N 个独立用户、 Q 个并行DF中继节点R和目标节点D,其中源节点S的 N 个用户希望通过从 Q 组并行中继器中选择的最优DF中继器与目标节点D通信.假设源节点S和目标节点D之间无法直接通信,且每一个中继器都有一个独立移动用户位于其附近,这会导致该中继器上出现CCI.在S-R段RF链路和R-D段FSO链路分别经历Kappa-mu衰落分布和M分布,CCI射频链路服从瑞利衰落.通信开始时,用户通过 Q 组并行中继器向目标节点D发送导频符号,目标节点D根据端到端信噪比的最大化,选择最佳用户和中继器.

源节点S数据被调制到RF负载波信号 x 上,然后经过RF信道传输到中继节点 R_q ,中继节点 R_q 接收到的信号可以表示为

$$y_{SR_q} = \sqrt{P_n} h_{SR_q}^{(n)} x + \sqrt{P_k} h_c x_c + e_{SR_q} \quad (1)$$

其中 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 表示选择的最佳信噪比用户 n , P_n 表示平均发射功率, P_k 表示CCI平均功率, x 为源节点S传

合于 LOS 分量的散射平均功率为 $2b_0\rho$. $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ 表示与 LOS 耦合的散射功率和所有散射分量功率的比值. $\xi_g = E[|U_S^G|^2] = 2b_0(1-\rho)$ 表示经典散射分量 U_S^G 的平均功率. 参数 $\Omega' = \Omega + \rho 2b_0 + 2\sqrt{2b_0\Omega\rho} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$ 表示相干平均功率, φ_A 和 φ_B 分别为 LOS 和耦合到 LOS 散射项的确定相位. M 分布涵盖了从弱湍流到强湍流的所有通道条件, 能够表征大多数现有的大气湍流模型. 指向误差参数 $g = w_{\text{zeq}}/2\sigma_s$ 定义为等效波束半径与接收机指向误差位移标准差 (jitter) 之比, 其中 $w_{\text{zeq}}^2 = w_z^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)/2v \exp(-v^2)$. $v = \sqrt{\pi} a / \sqrt{2} w_z$ 表示孔径半径 a 和波束宽度 w_z 之比.

M 分布结合指向误差具有以下统一的概率密度函数^[19]:

$$f_{\gamma_{R_q D}}(\gamma_{R_q D}) = \frac{g^2 A}{2\gamma} \sum_{m=1}^{\beta} b_m G_{1,3}^{3,0} \left[B \left(\frac{\gamma}{\gamma_{R_q D}} \right) \middle| \begin{matrix} 1+g^2 \\ g^2, \alpha, m \end{matrix} \right], \gamma \geq 0 \quad (8)$$

其中,

$$A = \frac{2\alpha^{a/2}}{\xi_g^{1+(a/2)} \Gamma(a)} \left(\frac{\xi_g \beta}{\xi_g \beta + \Omega'} \right)^{\beta+(a/2)},$$

$$a_m = \binom{\beta-1}{m-1} \frac{(\xi_g \beta + \Omega')^{1-(m/2)}}{(m-1)!} \left(\frac{\Omega'}{\xi_g} \right)^{m-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{m/2},$$

$$F_{\gamma_{\text{e2e}}}^{\text{CCI}}(\gamma) = \prod_{q=1}^Q \left[\prod_{n=1}^N e^{-\kappa_n \mu_n} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\kappa_n \mu_n)^i}{i!} \left(1 - \frac{e^{-\frac{1}{\bar{\gamma}_{\text{INR}}}}}{\Gamma(\mu_n + i)} G_{2,2}^{2,1} \left[\bar{\gamma}_{\text{INR}} \bar{A}_n \gamma \middle| \begin{matrix} 0, 1 \\ 0, \mu_n + i \end{matrix} \right] \right) + \frac{g^2 A}{2} \sum_{m=1}^{\beta} b_m G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, m, 0 \end{matrix} \right] \right. \\ \left. - \prod_{n=1}^N \frac{g^2 A}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\kappa_n \mu_n)^i}{i!} e^{-\kappa_n \mu_n} \left(1 - \frac{e^{-\frac{1}{\bar{\gamma}_{\text{INR}}}}}{\Gamma(\mu_n + i)} G_{2,2}^{2,1} \left[\bar{\gamma}_{\text{INR}} \bar{A}_n \gamma \middle| \begin{matrix} 0, 1 \\ 0, \mu_n + i \end{matrix} \right] \right) \sum_{m=1}^{\beta} b_m G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, m, 0 \end{matrix} \right] \right] \quad (11)$$

3.2 高信噪比情况下的渐近表达式

由于精确的解析表达式只能提供有限的物理洞察力, 为了进一步了解系统和衰落参数对系统性能的影响, 进一步推导了系统高信噪比下中断概率的渐近表达式. 在高信噪比情况下, 可将中断概率简化为 $P_{\text{out}} \approx (G_c \overline{\text{SNR}})^{-G_d}$. 其中, G_c 表示编码增益, G_d 表示分集阶数且 $G_d = -\lim_{\bar{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{\text{out}})}{\log(\bar{\gamma})}$. 在中、高信噪比下, $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$, 式(10)的每一项都是小于 1 的, 最后一项更小, 可以忽略^[15]. 故中断概率可近似为

$$P_{\text{out}}^{\infty} \approx \prod_{q=1}^Q \left[F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma) + F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma) \right] \quad (12)$$

假设用户具有相同的信道条件, 即所有的随机变量都是一样的, $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu, \kappa_1 = \kappa_2 = \dots = \kappa$, 计算与简

$$B = \frac{g^2 \alpha \beta (\xi_g + \Omega')}{(g^2 + 1) (\xi_g \beta + \Omega')},$$

$$b_m = a_m \left(\frac{\alpha \beta}{\xi_g \beta + \Omega'} \right)^{-(\alpha+m/2)}.$$

在上述公式中, α 是一个在散射过程中关于大尺度单元有效数量的正参数; β 是一个自然数, 表示衰落参数的值, 与小尺度涡流产生的衍射效应有关. Rytov 方差为 $\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L_{\text{RD}}^{11/6}$. 其中, L_{RD} 为 FSO 链路的传输距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为光波数, λ 为波长, C_n^2 为大气折射率结构常数. 进一步由式(8)可得 FSO 链路关于信噪比的累计分布函数, 即

$$F_{\gamma_{R_q D}}(\gamma) = \frac{g^2 A}{2} \sum_{m=1}^{\beta} b_m G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \middle| \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, m, 0 \end{matrix} \right], \gamma \geq 0 \quad (9)$$

3 系统性能

3.1 中继概率

中断概率是度量通信传输可靠性的物理量, 定义为瞬时接收信噪比低于特定阈值信噪比 γ_{th} 的概率^[20], 即

$$P_{\text{out}} = F_{\gamma_{\text{e2e}}}(\gamma) = P_r[\min(\gamma_{\text{RF}}, \gamma_{\text{FSO}}) < \gamma] \\ = \prod_{q=1}^Q \left[F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma) + F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma) - F_{\gamma_{\text{RF}}}(\gamma) F_{\gamma_{\text{FSO}}}(\gamma) \right], \gamma \geq 0 \quad (10)$$

根据式(7)、式(9), 可以得到系统存在 CCI 时中断概率为

化过程在附录 A^[15], 可以得到系统中中断概率的渐近近似表达式, 即

$$P_{\text{out}}^{\infty} = \prod_{q=1}^Q \left[\left[e^{-\frac{\kappa \mu}{\bar{\gamma}_{\text{INR}}} \frac{\Gamma(1+\mu)\Gamma(-\mu-i)\mu^i(1+\kappa)^{-\mu} \bar{\gamma}_{\text{INR}}^{\mu}}{\mu \Gamma(\mu)}} \right]^N \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{SR}_q}} \right)^{\mu N} \right. \\ \left. + \frac{g^2 A}{2} \sum_{m=1}^{\beta} b_m \left(\frac{\Gamma(\alpha-g^2)\Gamma(m-g^2)\Gamma(g^2)}{\Gamma(1+g^2)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^{g^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\Gamma(g^2-\alpha)\Gamma(m-\alpha)\Gamma(\alpha)}{\Gamma(1+g^2-\alpha)\Gamma(1+\alpha)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^{\alpha} \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^m \frac{\Gamma(g^2-m)\Gamma(m)\Gamma(\alpha-m)}{\Gamma(1+g^2)} \right) \right] \quad (13)$$

由式(13)可知,系统的分集阶数为 $G_d = Q \min\{\mu N, g^2, \alpha, m\}$, 一般情况下 $\alpha > m$, 故 $G_d = Q \min\{\mu N, g^2, m\}$. 进一步观察发现, RF 链路的分集阶数 $G_d = Q\mu N$, FSO 链路的分集阶数 $G_d = Q \min\{g^2, m\}$, 系统行为由两个链路中性能最坏的一个所主导. 另外, 从系统分集阶数中可以看出, 无论是改变用户数量还是 Kappa-mu/M 分布的衰落参数都不能明显提高 RF/FSO 系统的整体分集增益. 然而, 增加中继器的数量可以大大提高系统的分集增益.

因为 RF 和 FSO 链路的信道特性不同, 它们的平均信噪比不能完全吻合. 因此, 首先假设 RF 链路的平均信噪比是一个固定值, 而 FSO 链路的平均信噪比趋于无穷大. 渐近近似表达式可以写成

$$P_{\text{out}}^{\infty} = \prod_{q=1}^Q \left[e^{\frac{-\kappa\mu}{\bar{\gamma}_{\text{INR}}}} \frac{\Gamma(1+\mu)\Gamma(-\mu-i)\mu^{\mu}(1+\kappa)^{\mu}\bar{\gamma}_{\text{INR}}^{\mu}}{\mu\Gamma(\mu)} \right]^N \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{SR}_q}} \right)^{\mu N}, \quad \bar{\gamma}_{\text{R}_q D} \rightarrow \infty \quad (14)$$

式(14)中不存在 $\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}$ 项, 因此在高信噪比区域中断概率下降速度随着平均信噪比的增加变缓, 即出现错误平层现象. 同样, 假设 FSO 链路的平均信噪比是一个固定值, 而 RF 链路的平均信噪比趋于无穷大. 则式(13)中第一项为 0, 故渐近近似表达式可以写成

$$P_{\text{out}}^{\infty} = \prod_{q=1}^Q \left[\frac{g^2 A}{2} \sum_{m=1}^{\beta} b_m \left(\frac{\Gamma(\alpha-g^2)\Gamma(m-g^2)\Gamma(g^2)}{\Gamma(1+g^2)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^{g^2} + \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^{\alpha} \frac{\Gamma(g^2-\alpha)\Gamma(m-\alpha)\Gamma(\alpha)}{\Gamma(1+g^2-\alpha)\Gamma(1+\alpha)} + \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^m \frac{\Gamma(g^2-m)\Gamma(m)\Gamma(\alpha-m)}{\Gamma(1+g^2)} \right] \right], \quad \bar{\gamma}_{\text{SR}_q} \rightarrow \infty \quad (15)$$

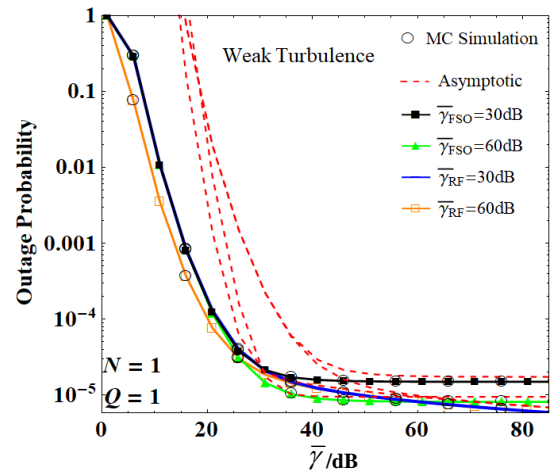
式(15)中不存在 $\bar{\gamma}_{\text{SR}_q}$ 项, 随着 RF 链路的平均信噪比增大, 错误平层无法避免.

4 仿真结果和分析

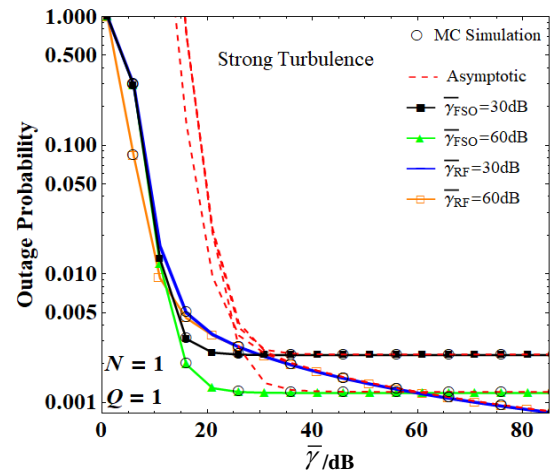
在本节中, 给出了 RF/FSO 系统在 Kappa-mu/M 分布信道衰落条件下的仿真结果, 并通过蒙特卡洛仿真来验证数值结果的准确性. 假设链路距离为 1km, 波长为 785 nm, 接收机孔径 $D = 0.01$ m, 光学波数 $k = 2\pi/\lambda$, 发射功率被认为归一化为 $\Omega + 2b_0 = 1$, 假设门限值 $\gamma_{\text{th}} = 5$ dB. $C_n^2 = 1.11 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $C_n^2 = 2.75 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 分别为弱、强湍流的大气折射率结构常数, 并认为大气折射率结构常数在传输间隔内保持不变. 取式(5)中的上限 i 为 30, 使级数收敛. 为了验证解析表达式的有效性, 给

出了蒙特卡罗仿真结果. 数值结果与模拟结果吻合较好, 验证了所提表达式的准确性.

首先, 在不存在同频干扰的情况下分析 RF/FSO 系统性能. 图 2(a)、图 2(b) 分别为 RF/FSO 系统在弱、强湍流条件下的中断概率. 图中黑色和绿色曲线代表在固定 FSO 链路的平均信噪比情况下, RF 链路的平均信噪比与中断概率的关系; 而蓝色和黄色曲线代表在固定 RF 链路的平均信噪比情况下, FSO 链路的平均信噪比与中断概率的关系. 结果表明, 数值结果与模拟结果吻合较好. 从图 2 中可以看到, 曲线整体随着平均信噪比的增加而单调下降, 同时错误平层也出现在高信噪比区域, 这与渐近分析的结果也是一致的. 弱、强湍流条件下的仿真结果显示, 弱湍流条件下的中断性能明显优于强湍流条件, 恶劣的大气条件对 RF/FSO 系统性能伤害明显. 从图 2(a) 中可以观察到, 当系统固定 FSO 链路平均信噪比时的中断概率比固定 RF 链路平均信



(a) 弱湍流($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)

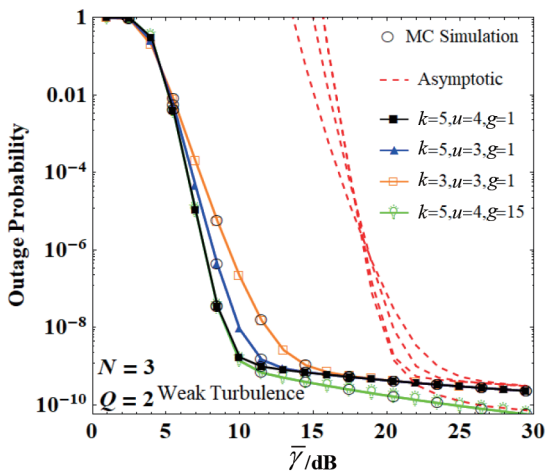


(b) 强湍流($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)

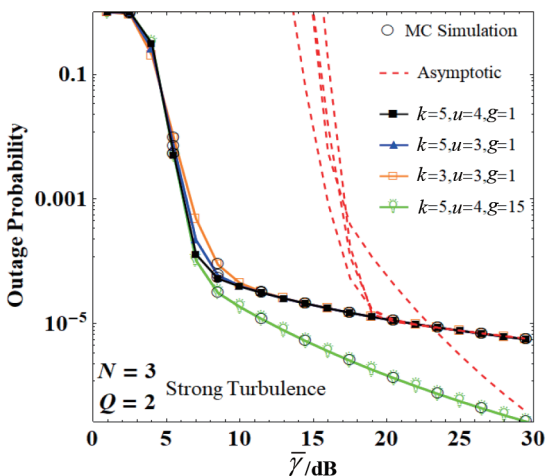
图2 RF/FSO 系统的中断概率仿真图

噪比时的中断概率要高. 如当固定 $\bar{\gamma}_{\text{FSO}} = 30$ dB, 在高信噪比区域的中断概率达到 1.49×10^{-5} 后便不再下降, 而当固定 $\bar{\gamma}_{\text{RF}} = 30$ dB 时中断概率在 80 dB 处能降到 5.81×10^{-6} . 进一步, 发现固定 $\bar{\gamma}_{\text{FSO}} = 60$ dB 时的中断概率在高信噪比区域降到了 8.11×10^{-6} , 并且固定 $\bar{\gamma}_{\text{RF}} = 30$ dB 时的中断概率和 $\bar{\gamma}_{\text{RF}} = 60$ dB 的中断概率在 80 dB 处分别为 5.81×10^{-6} 和 5.89×10^{-6} , 数值相差微小, 图形基本重合, 这种现象在强湍流条件下更加明显. 对式(13)的渐近分析结果显示, 系统行为由两个链路中性能最差的一个所主导. 故该仿真现象表明, 在不考虑 CCI 存在的情况下, 随着平均信噪比的增大, FSO 链路的性能最终限制了 RF/FSO 系统的性能. 在接下来的仿真中, 为了方便, 均假设 RF 链路和 FSO 链路的平均信噪比相等, 即 $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{\text{RF}} = \bar{\gamma}_{\text{FSO}}$.

图 3(a)、图 3(b) 分别为 RF/FSO 系统在弱、强湍流



(a) 弱湍流



(b) 强湍流

图 3 RF/FSO 系统在不同 κ, μ 值情况下中断概率仿真图

条件下不同 κ, μ 和指向误差 g 的中断概率. 从图 3 中可以看出, 曲线整体随着平均信噪比的增加而单调下降, 并在高信噪比区域出现了错误平台且恶劣的大气条件对 RF/FSO 系统性能伤害明显. 在弱大气湍流下, 当平均信噪比为 8.5 dB 时, 系统参数 $\kappa=5, \mu=4$ 的中断概率为 3.43×10^{-8} , 相比于 $\kappa=5, \mu=3$ 的 4.062×10^{-7} 和 $\kappa=3, \mu=3$ 的 5.425×10^{-6} 分别低了 1 和 2 个数量级. 这表明 κ, μ 有助于克服衰减的影响. 同时, 当平均信噪比高于 17 dB, κ, μ 的变化对中断概率没有影响, 三种情况的中断概率一致. 这是因为 κ, μ 的变化只改变了 RF 链路的信道衰落, 而根据图 2 的结论, 系统性能最终受限于两个链路中性能最差的链路, 此时系统受到 FSO 链路的影响, 故单单改变 RF 链路的信道衰落无法提高 RF/FSO 系统的最终性能. 结果与模拟结果吻合较好, 高信噪比渐近结果与数值结果接近, 验证了所提表达式的准确性. 另外, 可以明显观察到, 当系统提升 g , 在高信噪比区域中断概率明显得到了下降, 而在低信噪比区域没有改变. 结合图 2 的结论, 改善指向误差的实质是有效提升了 FSO 链路的中断性能进而提升了系统性能.

图 4(a)、图 4(b) 分别为 RF/FSO 系统在弱、强湍流条件下不同平均干扰噪声比的中断概率. 从图 4 中可以看出, 曲线整体随着平均信噪比的增加而单调下降. 在强大气湍流下, 当平均信噪比为 30 dB 时, 平均干扰噪声比 $\bar{\gamma}_{\text{INR}}$ 为 10 dB、20 dB、30 dB 情况下的系统中断概率分别为 0.08655、0.30887、0.45456. 而不考虑 CCI 存在的情况下, 系统的中断概率为 6.688×10^{-6} . 这表明 CCI 对系统中断性能有着严重的影响, 且随着平均干扰噪声比的提高, 对中断性能的损害越严重. 同时, 通过强弱仿真图对比可以观察到, 恶劣的大气条件对 RF/FSO 系统中断性能伤害明显. 结果与模拟结果吻合较好, 高信噪比渐近结果与数值结果接近, 验证了所提表达式的准确性.

图 5(a)、图 5(b) 显示了强湍流条件下, 不同用户数量对系统中断性能的影响. 其中, 图 5(a) 考虑不存在 CCI 的情况, 图 5(b) 考虑存在 CCI 的情况. 图中显示数值结果与模拟结果是一致的. 从图 5(a) 中可以观察到, 曲线整体随着平均信噪比的增加而单调下降, 在低信噪比区域, 用户数量 N 越大, 下降幅度越大. 如在 4 dB 处, $N=1, 5, 10, 15$ 时系统的中断概率分别为 0.67816、0.14534、0.02233、 9.52×10^{-4} , 故用户数量的增加在一定程度上提高了中断性能. 另外, 这种影响随着平均信噪比的上升逐渐减弱, 当平均信噪比大于 17 dB 后, 四条曲线合为一条曲线, 用户数的增加对系统性能几乎没有影响. 这是因为增加用户数量只提高了 RF 链路的性能. 从分集阶数 $G_d = Q \min\{\mu N, g^2, m\}$ 也得出, 改变用户数量不能明显提高系统的整体分集增益. 在渐近分

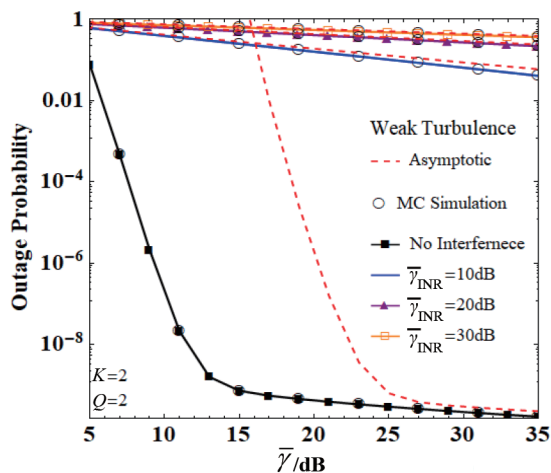
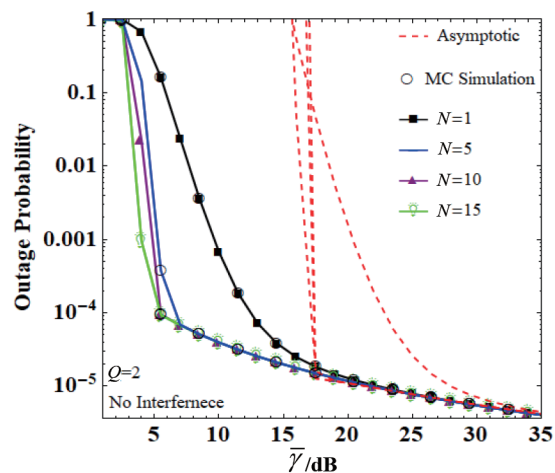
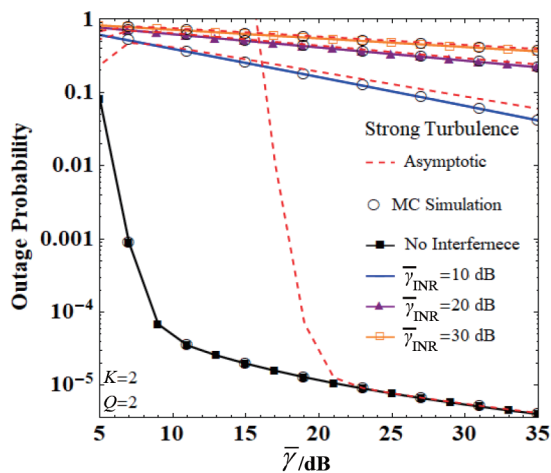
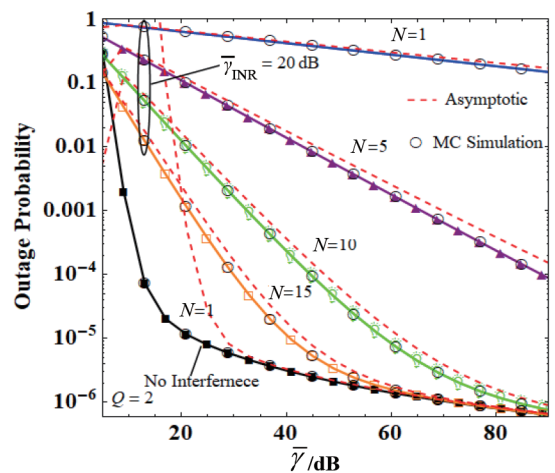
(a) 弱湍流($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)(a) 无 CCI($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)(b) 强湍流($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)(b) 存在 CCI($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)

图4 RF/FSO系统在不同平均干扰噪声比下中断概率仿真图

图5 RF/FSO系统在不同用户数量下中断概率仿真图

析中,已经对这种现象做出了准确的判断.图5(b)为RF/FSO系统存在CCI情况时不同用户数量下的中断概率仿真图.从图5(b)中可以观察到,各曲线随着用户数量的增加而下降,用户数量 N 越大,下降幅度越大并且趋近于系统不存在CCI情况下的中断概率.比如,在40 dB处, $N=1, 5, 10, 15$ 时系统的中断概率为0.415354、0.012586、0.000194、 9.4831×10^{-6} .多用户分集可以明显提高存在CCI的RF/FSO系统的中断性能.另外,在60 dB后 $N=15$ 的仿真曲线与 $N=1$ 无CCI情况的仿真曲线重合.这是因为系统性能最终受限于两个链路中性能最差的链路,此时FSO链路限制了系统的性能.增加用户数量能改善受CCI影响的RF链路的性能,但是无法提高FSO链路的性能.结合图5(a)的结论,多用户分集技术更适用于RF链路性能较差的RF/FSO系统中,比如存在CCI的RF/FSO系统,其可以大幅提升混合系统的性能.

图6(a)、图6(b)显示了强湍流条件下,不同中继节点数量对系统中断性能的影响.其中,图6(a)考虑不存在CCI的情况,图6(b)考虑存在CCI的情况.图中由解析表达式生成的实线、渐近表达式生成的虚线以及蒙特卡洛的仿真结果吻合较好.由图6(a)观察到,仿真曲线整体随着平均信噪比的上升而单调下降,且中继节点数量 Q 越多,下降幅度越大.具体来说,当平均信噪比为20dB时,系统 $Q=1, 2, 3$ 的中断概率分别为0.00327、 1.074×10^{-5} 、 3.5244×10^{-8} ,这意味着随着中继节点数量的增加,中断性能会得到大幅提升.正如渐近分析中得到的分集阶数 $G_d = Q \min\{\mu N, g^2, m\}$,中继节点数量 Q 的增加可以大大提高RF/FSO系统的整体分集增益.图6(b)为RF/FSO系统存在CCI情况时不同中继节点数量下的中断概率仿真图.从图中可以观察到,CCI的存在使得系统中断性能明显下降,同时,随着中继节点数量的增加,系统中断性能得到了一定程度的提升,但是

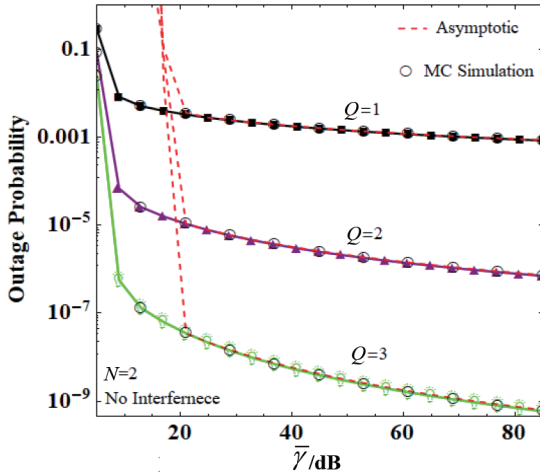
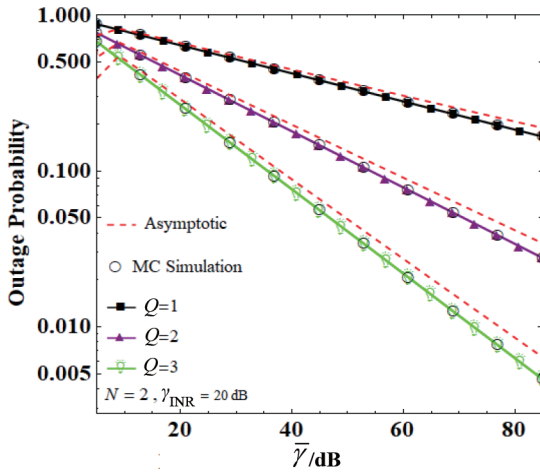
(a) 无 CCI($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)(b) 存在 CCI($\kappa = 5, \mu = 4, g = 1$)

图 6 RF/FSO 系统在不同中继节点数量下的中断概率仿真图

相比于无 CCI 情况下的中断性能还是有差距。比如,在 40 dB 时,存在 CCI 情况的系统, $Q=1, 2, 3$ 时,其中断概率分别 0.41557、0.1727、0.07176。这意味增加中继节点数量,能改善 CCI 对系统性能的影响。结合图 6(a) 的结论,中继节点数量的增加可以大大提高 RF/FSO 系统的整体分集增益,进而提升系统的性能。

5 结论

本文通过对在同频干扰下联合多用户分集与并行中继选择的 RF/FSO 系统在混合统计模型组合 Kappa-mu/M 分布下的系统性能研究,提出了关于联合多用户分集与并行中继选择的 RF/FSO 系统的解析表达式和渐近近似表达式,并对此进行仿真和蒙特卡洛验证,分析了信道衰落、指向误差、同频干扰、用户选择和并

行中继选择等关键因素对通信系统性能的影响。其中,系统采用 DF 中继方案。仿真结果表明,恶劣的大气环境和指向误差会显著降低系统的中断性能,而 Kappa-mu 衰落对系统性能的影响表现在,随着其参数的增大,系统性能亦随之增强。同频干扰的存在使得系统性能大幅下降,而多用户分集和并行中继选择可以改善受同频干扰的 RF/FSO 系统的性能。多用户分集和并行中继选择的结合是提高网络覆盖和提高网络服务质量的有效方法。另外,观察仿真结果可以得出与渐近分析一样的结论,即改变用户数量不能明显提高 RF/FSO 系统的整体分集增益,而增加中继器数量 Q 可以大大提高整体分集增益。这是由于联合多用户分集与并行中继选择的 RF/FSO 的系统行为由两个链路中性能最坏的一个所主导,而改变用户数量只是改善了 RF 链路,增加中继器可以提升整个系统的性能。因此,在工程应用中分析定位性能不足的链路并提升其性能是提升整个混合系统性能的关键。

附录

给出式(12)的计算和简化过程。

在高信噪比情况下, $G_{p,q}^{m,n} \left[x \begin{matrix} a_r \\ b_s \end{matrix} \right]$, 如果两个 $b_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 之间没有相差一个整数,且 $p \leq q, |x| \geq 1$, 则式(12)中 Meijer G 函数可表达为

$$G_{2,2}^{2,1} \left[\bar{\gamma}_{\text{INR}} \bar{A}_n \gamma \begin{matrix} 0, 1 \\ 0, \mu_n + i \end{matrix} \right] = \Gamma(\mu_n + i) + \frac{\Gamma(-\mu_n - i) \Gamma(1 + \mu_n + i)}{\Gamma(1 - \mu_n - i)} (\bar{\gamma}_{\text{INR}} \bar{A}_n \gamma)^{\mu_n + i} \quad (\text{A1})$$

$$G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \begin{matrix} 1, g^2 + 1 \\ g^2, \alpha, m, 0 \end{matrix} \right] = \left(\frac{\Gamma(\alpha - g^2) \Gamma(m - g^2) \Gamma(g^2)}{\Gamma(1 + g^2)} \times \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^{g^2} + \frac{\Gamma(g^2 - \alpha) \Gamma(m - \alpha) \Gamma(\alpha)}{\Gamma(1 + g^2 - \alpha) \Gamma(1 + \alpha)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^\alpha + \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{R_q D}} \right)^m \frac{\Gamma(g^2 - m) \Gamma(m) \Gamma(\alpha - m)}{\Gamma(1 + g^2)} \right) \quad (\text{A2})$$

为进一步简化,假设用户具有相同的通道条件,即所有随机变量相同,即 $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu, \kappa_1 = \kappa_2 = \dots = \kappa$, 结合式(A1)、式(A2)可以得到系统中断概率的渐近近似表达式(A3),即

$$P_{\text{out}}^{\infty} = \prod_{q=1}^Q \left[\left[e^{\frac{-\kappa\mu}{\bar{\gamma}_{\text{INR}}}} \frac{\Gamma(1+\mu)\Gamma(-\mu-i)\mu^i(1+\kappa)^{\mu-i}\bar{\gamma}_{\text{INR}}^{\mu-i}}{\mu\Gamma(\mu)} \right]^N \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{SR}_q}} \right)^{\mu_n N} + \frac{g^2 A}{2} \sum_{m=1}^{\beta} b_m \left(\frac{\Gamma(\alpha-g^2)\Gamma(m-g^2)\Gamma(g^2)}{\Gamma(1+g^2)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^{g^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\Gamma(g^2-\alpha)\Gamma(m-\alpha)\Gamma(\alpha)}{\Gamma(1+g^2-\alpha)\Gamma(1+\alpha)} \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{B\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{R}_q D}} \right)^m \frac{\Gamma(g^2-m)\Gamma(m)\Gamma(\alpha-m)}{\Gamma(1+g^2)} \right) \right] \quad (\text{A3})$$

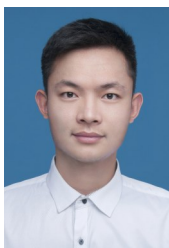
参考文献

- [1] MANSOUR A, MESLEH R, ABAZA M. New challenges in wireless and free space optical communication[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 95-108.
- [2] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林. 大气信道部分相干光通信链路性能分析与优化[J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 239-242.
CHEN C Y, YANG H M, JIANG H L. Secure selection for performance analysis and Optimization of partially coherent optical communication links through atmospheric channel[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(8): 239-242. (in Chinese)
- [3] EUNJU L, JAEDON P, DONGSOO H. Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1632-1644.
- [4] AHMED K, HRANILOVIC S. C-RAN uplink optimization using mixed radio and FSO fronthaul[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(6): 603-612.
- [5] YI X, SHEN C, YUE P, et al. Performance analysis for a mixed RF and multihop FSO communication system in 5G C-RAN[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(8): 452-464.
- [6] 孙健, 张文胜, 王承祥. 5G 高频段信道测量与建模进展[J]. *电子学报*, 2017, 45(5): 1249-1260.
SUN J, ZHANG W S, WANG C X. Developments on channel measurement and models in 5G high frequency band[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(5): 1249-1260. (in Chinese)
- [7] MAKKI B, SVENSSON T, ERIKSSON T, et al. Performance analysis of ARQ-based RF-FSO links[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 21(6): 1253-1256.
- [8] 邵军虎, 孙莹, 刘晓楠, 等. 强湍流条件下软切换 FSO/RF 混合链路中 HARQ 方案的对比分析[J]. *激光杂志*, 2019, 40(6): 162-166.
SHAO J H, SUN Y, LIU X N, et al. Comparative analysis on the HARQ schemes for soft-switching hybrid FSO/RF link under strong turbulence[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(6): 162-166. (in Chinese)
- [9] ALIMI I A, MONTEIRO P P, TEIXEIRA A L. Analysis of multiuser mixed RF/FSO relay networks for performance improvements in Cloud Computing-Based Radio Access Networks (CC-RANs)[J]. *Optics Communications*, 2017, 402:653-661.
- [10] 刘文亚, 赵尚弘, 王翔, 等. 基于 SC 分集的混合 FSO/RF 航空通信系统性能分析[J]. *激光与红外*, 2020, 50(5): 525-531.
LIU W Y, ZHAO S H, WANG X, et al. Performance analysis of hybrid FSO/RF airborne communication system based on SC diversity[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 525-531. (in Chinese)
- [11] AREZUMAND H, ZAMIRI-JAFARIAN H, SOLEIMANI-NASAB E, et al. Exact and asymptotic analysis of partial relay selection for cognitive RF-FSO systems with non-zero boresight pointing errors[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 58611-58625.
- [12] 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): 239-246.
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): 239-246. (in Chinese)
- [13] PETKOVIC M I, CVETKOVIC A M, DJORDJEVIC G T, et al. Partial relay selection with outdated channel state estimation in mixed RF/FSO systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2860-2867.
- [14] TONK V K, UPADHYA A, YADAV P K, et al. Mixed MUD-RF/FSO two way dcode and forward relaying networks in the presence of co-channel Interference[J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125415.
- [15] BALTI E, GUIZANI M. Mixed RF/FSO cooperative relaying systems with co-channel interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4014-4027.
- [16] YACOUB M D. The kappa-mu distribution and the eta-mu distribution[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, 49(1): 68-81.
- [17] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. *Table of Integrals, Series, and Products*[M]. 7th ed. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2007.
- [18] WANG Z, SHI W X, LIU W. Performance analysis of mixed RF/FSO system with CCI[J]. *IET Communications*, 2019, 13(14): 2199-2206.
- [19] JURADO-NAVAS A, GARRIDO-BALSELLS J M, PAR-

IS J F, et al. A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation[M]//Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes. 2th ed. Malaga, Spain: In-Tech, 2011: 181-206.

- [20] IKKI S, AHMED M H. Performance analysis of cooperative diversity wireless networks over nakagami-m fading channel[J]. IEEE Communications Letters, 2007, 11(4): 334-336.

作者简介



张敏惠 男,1995年出生于浙江省嘉兴市. 硕士研究生,主要从事 RF/FSO 通信和自由空间激光通信方面的研究工作.
E-mail:645470568@qq.com



童 杨 男,1997年出生于浙江省台州市. 硕士研究生,主要从事 RF/FSO 通信和自由空间激光通信方面的研究工作.
E-mail:1246898298@qq.com



王 怡(通信作者) 女,1980年生于黑龙江省哈尔滨市. 博士,教授,主要从事星地光通信、RF/FSO 通信和自由空间激光通信方面的研究工作.
E-mail:wcy16@cjlu.edu.cn