

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306888

无线紫外光与射频混合链路中继协作方案性能分析*

邵军虎 史魏征 刘依朔 刘再平

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 西安理工大学西安市无线光通信与网络研究重点实验室 西安 710048)

摘要:将无线紫外光通信与传统射频通信进行优势互补结合,针对双链路异构组网时的中继协作混合传输问题,采用建模与数值计算分析的方法,对比分析了不同策略和参数条件下系统的中断概率和误码率性能。基于无线紫外非直视散射信道和射频无线衰落信道的各自特点,建立了描述双链路并行传输中继与协作问题的模型,给出了3种典型情况下的传输策略。通过理论分析和数值计算的方法,给出了不同策略下混合链路中继的中断概率和误码率表达式,并在不同信道参数条件下对系统性能进行了对比分析。研究表明,相比于无线紫外光单链路传输,混合链路的中继协作策略在不同距离和不同参量条件下获得更低的系统中断概率。在误码率为 1×10^{-6} 条件下,双链路中继传输可以在不同湍流强度和不同莱斯因子情况下可获得约0.4~6.1 dB的信噪比增益改善。

关键词:紫外光通信;射频通信;中继协作;中断概率;误码率

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Performance analysis of hybrid wireless ultraviolet and radio frequency relaying cooperative communication network

Shao Junhu Shi Weizheng Liu Yishuo Liu Zaiping

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: By combining wireless ultraviolet (UV) communication and radio frequency (RF) communication, leveraging their respective advantages, the relay cooperation scheme for hybrid links was investigated through modeling and numerical computation method. By utilizing the unique features of the wireless UV non-line-of-sight scattering channel and the RF wireless fading channel, a hybrid UV/RF cooperation and relay model was established, along with three distinct transmission strategies, in typical channel conditions. The probability of system outage and the bit error rate (BER) were theoretically investigated along with their analytical expressions. Finally, the system performance was numerically calculated under different channel parameters for hybrid UV/RF links. The numerical results demonstrate that the hybrid UV/RF relay cooperation scheme can achieve significantly lower outage probability across varying link distances and channel conditions in comparison to a single UV communication link. When BER is equal to 1×10^{-6} , the proposed strategies can achieve a performance gain ranging from 0.4 to 6.1 dB across various UV channel turbulence strengths and RF channel Ricean factors.

Keywords: ultraviolet (UV) communication; radio frequency (RF) communication; relay cooperation; interruption probability; bit error rate

收稿日期: 2023-09-13 Received Date: 2023-09-13

* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(12104362)、陕西省重点研发计划一般项目(2020GY-036)、陕西省重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-05-03)资助

0 引言

无线紫外光 (ultraviolet, UV) 通信是一种采用 200 ~ 280 nm 波长“日盲区”紫外光携带信息,利用大气散射传输的无线光通信方式^[1]。受大气臭氧层吸收的影响,近地环境“日盲区”紫外波段的背景杂散光几乎为 0,加上紫外光在大气中散射传播的特点,使非直视 UV 通信链路具有天然的抗干扰与安全性优势。然而,由于紫外光大气传播具有较大的路径吸收损耗,功率受限条件下 UV 链路的通信距离通常局限在一定范围内^[2]。将 UV 链路的优势与传统射频 (radio frequency, RF) 链路进行互补结合,双链路混合异构组网传输方案,对于高可靠安全通信需求的场景无疑具有广阔的应用前景。

针对 UV 链路多跳组网通信技术的研究,已获得领域内专家学者们的广泛关注。采用多跳中继方式在扩大紫外光通信距离,文献[3]提出一种方法在提高紫外光通信系统覆盖范围的同时减少系统功率消耗,进而提升紫外光组网通信能力。针对紫外光多跳中继通信网络的节点连通性问题,Vavoulas 等^[4]通过调整节点密度、发射功率和数据速率来降低中继节点孤立的概率,以增强紫外光多跳中继通信网络的连通性。文献[5]利用蒙特卡洛方法建立了一种适用于分析短距离紫外光散射通信覆盖范围的非直视 UV 链路传输模型。针对大气能见度对 UV 链路的路径损耗和误码率影响问题,文献[6]使用简化的紫外光单次散射模型,通过仿真分析对比了不同大气条件下紫外光通信链路的性能。为了克服紫外光通信中光源器件发射功率受限和大气信道衰减等问题影响,李济波等^[7]提出了一种采用多跳中继方式构建紫外光长距离通信链路的方法。

为了分析中继节点对紫外光通信网络传输距离的影响,Ardakani 等^[8]计算了弱湍流情况下基于译码转发的串行中继协作无线紫外光系统的中断概率性能。文献[9]针对非直视紫外光通信系统提出了一种使用最佳中继选择的协作通信方案,并对系统的中断概率进行了分析。文献[10]研究了双跳放大转发非直视紫外光通信中的湍流效应,并分析了通过中继传输提高连通性的性能,通过引入中继节点进行信号的放大和转发,从而扩展了通信距离和改善了信号质量。文献[11]分析了强湍流情况下基于放大转发的非直视无线紫外光通信系统性能。

关于无线光通信链路和 RF 链路混合组网通信方面,文献[12]分别对使用双 Gamma 和 Nakagami 分布的自由空间光通信 (free space optical, FSO) 和射频链路信道模型,评估了固定增益放大转发中继双跳混合 FSO/RF 的性能。文献[13]基于译码转发策略,计算分析了双跳

混合 RF/FSO 通信系统的误码率性能和容量,并考虑了 FSO 链路的指向性误差,这种策略将射频和自由空间光通信进行组合,以充分利用他们各自的特点和优势,提高通信系统的性能和可靠性。相比于 FSO 视距链路通信需要指向、捕获和跟踪对准的严格要求,UV 链路的非直视工作模式在一些典型应用场景下更具潜力^[14-15],例如电磁静默场景下的安全通信。无线 UV 通信作为无线光通信的一种特殊波段应用,单纯采用 UV 链路多跳组网通信系统,虽然可以扩大无线紫外光通信距离和覆盖范围,但受限于其大气传播特性和器件工艺等因素影响,通常需要较多的中继站来实现长距离通信和广域覆盖。

将 UV 链路与传统 RF 链路进行互补结合,本文针对 UV/RF 混合链路异构组网通信问题,建立了双链路并行传输的中继与协作问题模型,给出了混合系统中断概率和误码率的表达式,并在不同信道参数条件下进行了数值计算分析。相比于单 UV 链路通信系统,UV/RF 混合链路中继协作组网的通信方案在相同传输距离下,可获得更低的系统中断概率和误码率性能。

1 双链路系统与中继协作模型

无线紫外光与射频双链路并行传输的点-to-point 物理层通信架构框图,如图 1 所示。这里系统终端具有同时支持紫外光通信和射频通信的双通道通信,紫外光通信和射频通信链路采用并行工作方式。在发射端,采用了两条通信链路的数据传输按比例划分的策略,UV 链路主要用于子网内部可靠安全通信,以最大化利用紫外光通信的安全性传输高安全级别的小比例数据。将按比例划分的信息序列分别通过 UV 链路和 RF 链路的调制映射。在传输过程中,通过紫外光链路和射频链路同时传输信息,这种双链路传输的方式可以充分利用双链路资源,并发挥相互协作的优势,从而确保混合系统数据传输的安全性和可靠性。

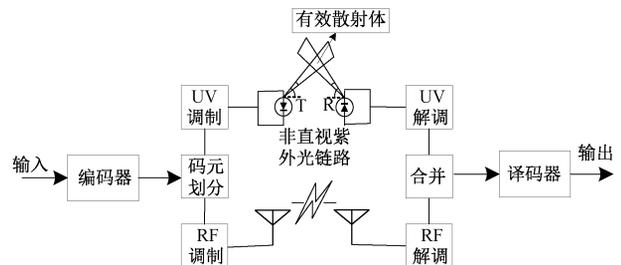


图 1 点-to-point UV/RF 混合链路原理

Fig. 1 Schematic diagram of point-to-point UV/RF hybrid link

在接收端,对来自 UV 链路和 RF 链路的信号进行解调和码元合并后,送入译码器执行前向错误纠正后输出。这里的译码器与发端编码器规则一致,可以是 UV/RF 链

路共用,即混合编码方式;也可以是 UV/RF 链路各自独立使用一对编解码器,独立进行信息纠错后再合并输出。前者可节省一对编码器的开销,同时可在同一个码字序列中体现双链路质量差异,即可利用双链路状态优劣来进行协作译码纠错,缺点是需要双链路速率和时延相匹配。后者进行双链路独立的编码和译码操作,适用于任意速率和时延场景,同时可在链路层协议的错误帧重传环节根据信道质量状态进行双链路的协作重传,从而提高系统可靠性。

上述采用紫外光与射频混合通信系统,可以充分利用双链路资源以及相互协作的优势,提高资源利用率和系统传输可靠性。同时,由于紫外光与射频信号的大气传播特性不同,UV 链路和 RF 链路能够更好地互补适应不同环境条件 and 需求,从而提供更稳定和可靠的通信服务。

1.1 紫外光非直视链路信道模型

紫外光点对点非直视链路传输模型如图 2 所示,这里 T 和 R 代表发射端和接收端, θ_T 和 θ_R 分别表示发射光束的视场角和接收光束的视场角, β_T 和 β_R 表示发射仰角和接收仰角。区域 V 是发射光束和接收光束的重合部分,称为有效散射体, $\beta_s = \beta_T + \beta_R$ 称为散射角。

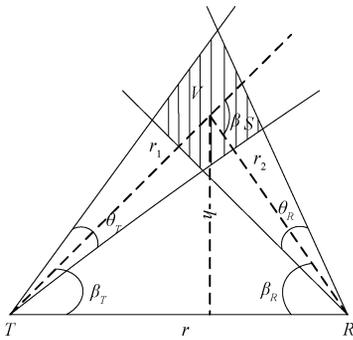


图 2 紫外光非直视传输模型

Fig. 2 Non-line-of-sight Ultraviolet light transmit model

如图 2 中所示,为了便于分析,在无线紫外光非直视通信链路中,通常分解为两条紫外光直视通信链路,第 1 条链路是发射端 T 至有效散射体 V 的直视路径,距离记为 r_1 ;第 2 条链路是从有效散射体 V 到接收端 R 的直视路径,距离记为 r_2 。假设 r 是 T 和 R 之间的收发通信距离, h 为有效散射体 V 距离收发水平面的垂直高度,则 $r_1 = r \sin \beta_R / \sin \beta_s$, $r_2 = r \sin \beta_T / \sin \beta_s$ 。只有能够到达有效散射体 V 的光子才能被接收端 R 接收到。

在紫外光通信中,大气湍流会使光信号强度产生闪烁效应,这是由于大气中的湍流引起的光线的折射和散射,导致接收机接收到的信号强度出现快速波动,增加了系统信号的失真和噪声影响。为了描述这种波动效应,

通常采用 Gamma-Gamma 模型^[16],其概率密度函数可以表示为:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0 \quad (1)$$

其中, I 为直视链路接收信号强度, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是第二类修正 Bessel 函数。 α, β 为散射环境下大尺度和小尺度散射系数,表达式为:

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_i^2}{(1 + 0.65d^2 + 1.11\sigma_i^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_i^2(1 + 0.69\sigma_i^{12/5})^{5/6}}{(1 + 0.9d^2 + 0.62\sigma_i^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (3)$$

其中,参数 $d = \sqrt{kA_r^2/4r}$, A_r 为接收孔径; Rytov 方差 $\sigma_i^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} r^{11/6}$ 是描述湍流强度的一个重要参数,这里 k 为光波数, r 为通信距离; C_n^2 为大气折射率结构常数,其取值通常介于 $10^{-17} \sim 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 。

Rytov 方差与 α, β 之间的关系为:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (4)$$

式中: α, β 取值不同,对应不同湍流闪烁强度的区域。

1.2 射频链路信道模型

根据混合组网通信场景,本文假设 RF 链路为服从 Ricean 分布的衰落信道模型^[17],其中 x 表示射频链路的发端已调信号,则接收信号 y 可以表示为:

$$y = hx + n \quad (5)$$

其中, n 表示为均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声, h 为射频信道的衰落系数,其概率密度函数为^[18]:

$$f_{\gamma_{RF}}(\gamma_{RF}) = \frac{K+1}{\bar{\gamma}_{RF}} \exp \left[- (K+1) \frac{\gamma_{RF}}{\bar{\gamma}_{RF}} - K \right] \times$$

$$I_0 \left(2 \sqrt{K(K+1)} \frac{\gamma_{RF}}{\bar{\gamma}_{RF}} \right) \quad (6)$$

其中, γ_{RF} 为射频信道的瞬时信噪比, $\bar{\gamma}_{RF}$ 为平均信噪比满足 $\gamma_{RF} = \bar{\gamma}_{RF} h^2$, K 是 Rician 因子, I_0 是第 1 类零阶修正贝塞尔函数。对式(6)进行积分可得到 γ_{RF} 的累积分布函数为:

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

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

1.3 双链路中继协作模型

结合紫外光通信和射频通信的彼此优势,在保障局域范围数据传输安全条件下,利用射频链路实现更广的覆盖范围和更高效的数据传输。本文将无线 UV/RF 混

合链路中继与协作系统,建模如图 3 所示。这里以一个双跳中继场景进行传输策略示意,包括源节点 S、中继协作节点 R、和目的节点 D,中继默认采用译码转发 (decode-and-forward, DF) 方式。该策略中,假设每个节点均配备有 UV/RF 收发器,节点 R 根据链路 L_{SR} 的信道状态信息选择 UV/RF 的传输比例与协作程度,根据节点 D 的反馈信息获得链路 L_{RD} 的状态信息,从而决定 R 到 D 的双链路传输比例与协作程度。

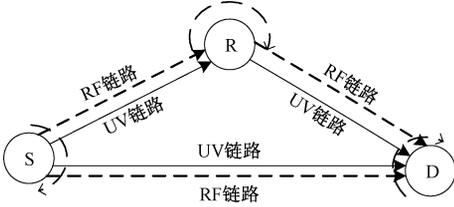


图 3 无线紫外光与射频中继传输机制示意图

Fig. 3 Wireless ultraviolet and radio frequency relay transmission mechanism diagram

由图 3 中继协作转发机制可以看出,UV/RF 混合通信系统的各节点,可以根据 UV/RF 双链路的各自质量状态,进行多样化的中继协作策略选择,比较典型的 3 种情形如下所示。

情形 1:当源节点 S 距离目的节点 D 较远,同时 S 附近有 UV 链路可用的 R 节点,首先使用 UV 链路进行第一跳传输,即源节点 S 将信息经过编码后通过 UV 链路传输到中继节点 R,中继节点 R 利用译码的信息重新编码后利用 RF 链路进行下一级中继转发直至到达目的节点 D,目的节点 D 将接收信号进行纠错译码后恢复数据。

情形 2:当源节点 S 到中继节点 R 的 UV 链路不可用时,情形 1 中的第 1 跳 UV 链路传输无法实现,因此,源节点 S 直接使用 RF 链路将信息传输到中继节点 R,中继节点 R 收到的信息进行译码转发,直至到达目的节点 D。

情形 3:当源节点 S 的信息可以直接到目的节点 D 时,可以利用 UV 与 RF 双链路并行传输。源节点 S 将信息按比例分配给 UV 链路和 RF 链路进行传输,目的节点 D 将收到的 UV 和 RF 信号分别进行纠错译码后合并恢复数据。

综上所述,针对不同情形下,采用不同的双链路组合中继与协作转发策略,可以更加匹配实际通信环境和链路条件,通过选择最佳的传输方式,提高通信系统传输的效率和数据可靠性。

2 系统中断概率与误码率

2.1 无线紫外光与射频混合链路的中断概率

对于 UV 链路和 RF 链路并行使用的混合通信系统,

当两条链路的输出信噪比均低于所设定的阈值信噪比时,将导致系统通信的中断。因此,UV/RF 混合通信链路的中断概率可以表示为:

$$P_{out}^{hyb} = P_{out}^{UV}(\gamma_{thUV}) \times P_{out}^{RF}(\gamma_{thRF}) \quad (8)$$

式中: $P_{out}^{UV}(\gamma_{thUV})$ 表示无线紫外光链路的中断概率, $P_{out}^{RF}(\gamma_{thRF})$ 表示射频链路的中断概率。

无线紫外光链路中断概率的表达式为:

$$P_{out}^{UV} = P(\gamma_{UV} < \gamma_{th,UV}) = F(\gamma_{th,UV}) \quad (9)$$

将式(1)代入式(9)中可以得到:

$$P_{out}^{UV}(\gamma_{thUV}) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \gamma_{UV}^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta\gamma_{UV}}) \quad (10)$$

同理,RF 链路的中断概率表达式为:

$$P_{out}^{RF}(\gamma_{thRF}) = P(\gamma_{RF} < \gamma_{th,RF}) = F(\gamma_{th,RF}) \quad (11)$$

将式(7)代入式(11),可得:

$$P_{out}^{RF}(\gamma_{thRF}) = 1 - Q_1\left(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(1+K)}{\gamma_{RF}}\gamma_{th,RF}}\right) \quad (12)$$

2.2 紫外光通信链路的误码率

对于非直视 UV 链路,采用开关键控调制 (on-off keying, OOK) 方式,接收到的光功率可以表示为^[19]:

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s P_s \theta_r^2 \sin(\beta_T + \beta_R)}{32\pi^3 r \sin\beta_i \left(1 - \cos\frac{\theta_T}{2}\right)} \exp\left[-\frac{K_c r (\sin\beta_T + \sin\beta_R)}{\sin(\beta_T + \beta_R)}\right] \quad (13)$$

其中, P_t 为紫外光源的发射功率, A_r 为紫外探测器的孔径面积, P_s 为散射相函数, r 为通信距离, K_c 为大气信道衰减系数由大气散射系数 K_s 和大气吸收系数 K_a 组成 $K_c = K_s + K_a$ 。

在有大气湍流的视距紫外光通信链路中,传输的光信号会遭受大气湍流引起的光衰减和光强闪烁的影响,因此,接收端的信噪比 (signal noise ratio, SNR) 可以表示为^[20]:

$$\langle SNR_{NLOS} \rangle = \frac{SNR_{NLOS}}{\sqrt{\left(\frac{P_{r,NLOS}}{\langle P_r \rangle}\right) + \sigma_I^2 SNR_{NLOS}}} \quad (14)$$

其中, $P_{r,NLOS}$ 是没有湍流的接收功率, $\langle P_r \rangle$ 是在湍流情况下的接收平均功率, SNR_{NLOS} 是没有湍流时的信噪比,其表达式为:

$$SNR_{NLOS} = \sqrt{\frac{P_{r,NLOS}}{2R_b h c / \lambda}} \quad (15)$$

式中: R_b 是数据传输率, λ 为波长, c 是光速, h 是普朗克常数。

在实际大气湍流环境下,湍流引起的闪烁衰减会使

功率比 ($P_{r0}/\langle P_r \rangle$) 发生变化, 进而导致平均信噪比 $\langle SNR \rangle$ 恶化。非直视 UV 链路可以近似看作是两条直视链路 r_1 和 r_2 的叠加, 针对采用 OOK 调制的 UV 链路的误码率可以表示为:

$$BER_{NLOS} = \int_0^\infty f(I_{r2}) Q(\langle SNR_{NLOS} \rangle) dI_{r2} \quad (16)$$

式中: 函数 $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$ 。

2.3 射频链路的误码率

如果平均 SNR 低于射频链路设定的阈值 γ_{thRF} , 则射频链路发生中断, 射频通信链路的 SNR 可以表示为:

$$SNR_{RF} = \frac{P_{RF} \eta_{RF} h^2}{\sigma_2^2} = \gamma_{thRF} h^2 \quad (17)$$

其中, P_{RF} 为射频链路的发射功率, h 为射频信道状态, η_{RF} 为射频信道的路径损耗, 当频率为 60 GHz 时, 射频链路的路径损耗可以表示为:

$$\eta_{RF} = G_t + G_r - 20 \lg\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - L(\alpha_{osg} + \alpha_{rain}) \quad (18)$$

其中, G_t 和 G_r 分别为射频链路的发送和接收天线的增益, λ 为射频信号的波长, α_{osg} 和 α_{rain} 分别为由大气吸收和雨导致的衰减参数。

2.4 中继链路的误码率

在 UV/RF 混合通信链路的单中继协作传输误码率分析中, 将整个传输过程分为两个阶段。在第 1 阶段, 源节点 S 到中继节点 R 信息传输阶段采用非直视 UV 链路传输; 在第 2 阶段, 中继节点 R 到目的节点 D 信息传输阶段采用 RF 链路传输。因此, UV/RF 混合通信链路其中继协作传输链路的误码率 (bit error rate, BER) 可以表示为:

$$BER_{SRD} = (1 - BER_{RD}) BER_{SR} + (1 - BER_{SR}) BER_{RD} \quad (19)$$

其中, BER_{SR} 和 BER_{RD} 分别为源节点 S 到中继节点 R 和中继节点 R 到目的节点的误码率。

3 数值计算分析

为了方便对比 UV/RF 混合组网中继协作系统在不同信道条件下的性能, 本文后续数值计算采用 UV/RF 双链路的主要参数分别如表 1 和 2 所示。

为了尽可能模拟实际情况, 假设紫外光链路波长为 266 nm, 发射功率为 50 mW, 发射角度和接收角度都为 30°, 通信距离为 2 000 m, 调制方式为 OOK 调制, 射频链路采用 BPSK 调制方式。利用式(8) 计算混合链路的中断概率, 由图 4 可以看出, 在 UV 单链路传输和 UV/RF 混合链路传输的工作方式中, 随着信噪比的增加, 中断概

表 1 UV 通信链路参数

Table 1 Ultraviolet light link parameters

UV 通信链路	
参数	数值
紫外光波长	266 nm
发射功率	50 mW
光电倍增管效率	0.3
光学滤波器效率	0.2
接收孔径面积	1.77 cm ²
发射角度	30°
接收角度	30°

表 2 RF 通信链路参数

Table 2 Radio frequency link parameters

RF 通信链路	
参数	值
载波频率	60 GHz
发送功率	50 mW
发射天线增益	44 dBi
接收天线增益	44 dBi
衰减	15.1 dB/km
Ricean 因子 K	0~10
带宽	250 MHz
噪声功率谱密度	-114 dBm/MHz
接收机噪声系数	5 dB

率会逐渐减小。相比于 UV 单链路传输, UV/RF 混合通信链路在相同信噪比条件下具有更低的中断概率和更高的可靠性, 尤其是在信噪比增加的情况下, 并行通信链路的质量较好。这使得 UV/RF 混合链路在实际应用中更加具有优势, 并可以克服一下 UV 单链路传输的问题, 提供更稳定可靠的数据传输。

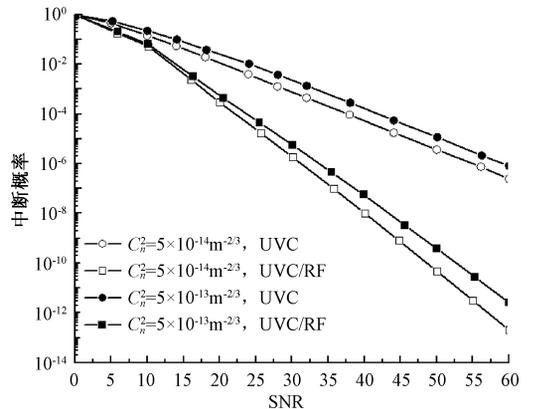


图 4 UV 单链路与 UV/RF 混合链路的中断概率
Fig. 4 Interruption probability of UV Single link and UV/RF hybrid link

从图 5 可以看出, 在通信距离为 2 000 m、SNR 为 40 dB 条件下, 可以看出在中等湍流 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ 和

强湍流 $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 条件下,UV/RF 混合链路的中断概率分别为 1.4×10^{-8} 和 1.2×10^{-5} 。这表明随着湍流强度的增加,混合系统的中断概率也会增加,符合之前的讨论。另外,在通信距离为 3 000 m、SNR 为 40 dB 条件下,中等湍流条件下的中断概率为 2.7×10^{-5} ,而强湍流条件下的中断概率为 4.4×10^{-5} ,由此可以看出,随着湍流强度的增加,对混合链路来说,湍流对 UV 链路的影响更大,可能导致 UV 链路的中断,但并不会对 RF 链路的传输质量产生明显影响,这是符合真实情况的,因为 UV/RF 混合通信系统中,UV 链路的传输受到光的散射和干扰的影响,湍流会引起光的折射和散射从而导致 UV 信号的传输质量下降,导致传输中断。而 RF 链路则相对不容易受到湍流的干扰,RF 链路是利用电磁波传输信息的,很少与湍流直接相互作用,因此湍流对 RF 链路的传输质量影响较小。

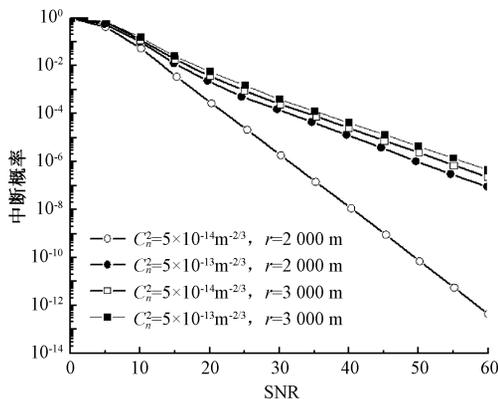
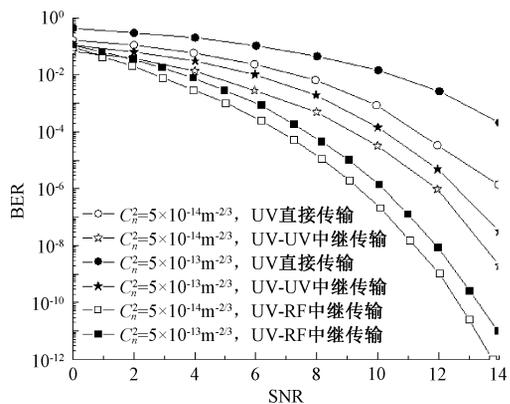
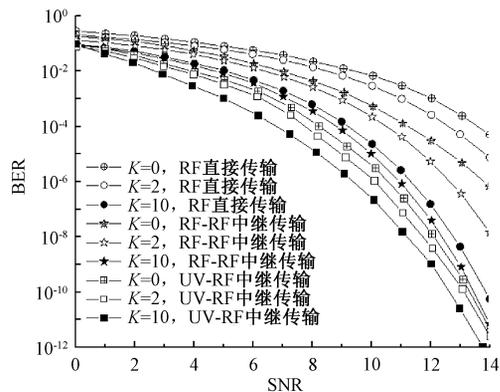


图 5 湍流和距离不同的 UV/RF 混合传输的中断概率
Fig. 5 Interruption probability of UV/RF hybrid transmission with turbulence and different distances

利用式 (16)、(17)、(19) 可以分别计算出 UV 链路、RF 链路和 UV/RF 混合链路的误码率,如图 6 所示。当 UV 链路的信噪比和 RF 链路的信噪比都较高且中断概率较低,则这两种通信方式的性能较好,UV/RF 混合通信链路的质量较高,可以采用混合链路进行数据传输。如果 UV 通信链路的信噪比较低,而 RF 通信链路的信噪比较高,那么 RF 通信链路的性能较好,UV/RF 混合通信链路的质量主要取决于 RF 通信链路的性能。反之,当 UV 通信链路的信噪比较高,而 RF 通信链路的信噪比较低时,UV 通信链路性能较好,在这种情况下,UV/RF 混合通信链路的质量主要取决于 UV 通信链路。当 UV 通信链路和 RF 通信链路的信噪比都较低且中断概率较高,两种通信方式的性能较差,低信噪比和高中断概率会导致信号质量下降和数据传输不可靠,这种情况下,UV/RF 混合通信链路的质量也会受到影响,很难提供良好的传输性能。



(a) 不同湍流时的误码率
(a) Bit error rate under different turbulence



(b) 不同Ricean因子时的误码率
(b) Bit error rate for different Ricean factors

图 6 混合 UV/RF 链路中继协作不同参数情况下的误码率
Fig. 6 Bit error rate of mixed UV/RF link relay collaboration with different parameters

由图 6(a) 可以看出,在 BER 为 10^{-6} 、中等湍流 $C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 的条件下,可以对比 UV 单链路、UV-UV 中继链路和 UV-RF 中继链路所需的信噪比数值情况,如表 3 所示。以 UV 单链路传输情况作为基准,可以得出,UV-UV 中继传输比 UV 单链路传输的 SNR 减少了 2.2 dB,UV-RF 中继传输比 UV 单链路传输的 SNR 减少了 4.6 dB,UV-RF 中继传输比 UV-UV 中继传输的 SNR 减少了 2.4 dB。在强湍流 $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 的条件下,UV-UV 中继传输比 UV 单链路传输的 SNR 减少了 3.7 dB,UV-RF 中继传输比 UV 单链路传输的 SNR 减少了 6.1 dB,UV-RF 中继传输比 UV-UV 中继传输的 SNR 减少了 2.4 dB。

由图 6(b) 可以看出,在 BER 为 10^{-6} 、莱斯因子 $K=2$ 的条件下,比较了 3 种传输情况:RF 单链路传输、RF-RF 中继链路传输和 UV-RF 中继链路传输,具体参如表 4 所示。以 RF 单链路传输情况作为基准,经过对比可以看出,在 RF-RF 中继链路传输情况下比 RF 单链路传输的 SNR 减少了 2.2 dB,在 UV-RF 中继链路传输情况下比

RF 单链路传输的 SNR 减少了 4.7 dB, 另外, 将 UV-RF 中继传输链路与 RF-RF 中继传输链路进行比较, 发现 UV-RF 中继传输比 RF-RF 中继传输的 SNR 减少了 2.5 dB。而当莱斯因子 $K=10$ 时, 情况略有不同, RF-RF 中继传输比 RF 单链路传输的 SNR 减少了 0.4 dB, UV-RF 中继传输比 RF 单链路传输的 SNR 减少了 2 dB, UV-RF 中继传输比 RF-RF 中继传输的 SNR 减少了 1.6 dB。

表 3 BER 为 10^{-6} 时不同湍流 UV 链路信噪比参数

Table 3 Signal to noise ratio parameters for different turbulent UV links with BER of 10^{-6}

C_n^2	UV 单	UV-UV 中继	UV-RF 中继
$C_n^2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$	14.1	11.9	9.5
$C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$	16.3	12.6	10.2

表 4 BER 为 10^{-6} 时不同莱斯因子 RF 链路信噪比参数

Table 4 RF link signal-to-noise ratio parameters with different Rice factors when BER is 10^{-6}

K	RF 单	RF-RF 中继	UV-RF 中继
2	14.8	12.6	10.1
10	11.3	10.9	9.3

4 结 论

综上所述, 通过 UV 单链路传输、RF 单链路传输、UV-UV 中继传输、RF-RF 中继传输和 UV-RF 中继传输方案的比较, 可以观察到一个共同的趋势: 随着信噪比的增加, 误码率会逐渐降低, 通信链路的传输质量会相应提高。在相同的信噪比条件下, UV-RF 中继传输方案具有更好的误码率性能, 这表明 UV-RF 中继传输方案能够为整个通信链路提供更好的信号质量, 减少误码率, 并提高系统的可靠性。相比于直接传输方案, 中继传输方案克服了直接传输中可能存在信号衰减、干扰和传输距离限制等问题, 且拥有更好的误码率性能, 这表明中继协作通信可以有效改善通信系统的传输质量。

参考文献

[1] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论 [M]. 科学出版社, 2011.
KE X ZH. Self-Organizing Networks Theory of Ultraviolet Light [M]. Science Press, 2011.

[2] ZHANG X W, ZHAO S H, LI Y J, et al. Multi-channel directional media access control protocol for airborne ultraviolet communication based on space division multiplexing [J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 451-455.

[3] HE Q F, XU Z Y, BRIAN S. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications [C].

MILCOM 2010 Military Communications Conference, San Jose, USA, 2010.

[4] VAVOULAS A, SANDALIDIS H G, VAROUTAS D. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3 (9): 750-757.

[5] 赵太飞, 柯熙政. Monte Carlo 方法模拟非直视紫外光散射覆盖范围 [J]. 物理学报, 2012, 61(11): 285-296.
ZHAO T F, KE X ZH. Simulation of non-directly visible ultraviolet light scattering coverage by Monte Carlo method [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (11): 285-296.

[6] 汤义男, 赵卫, 谢小平. 大气信道简化单次散射模型 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 22-26.
TANG Y N, ZHAO W, XIE X P. Simplified single-scattering model of atmospheric channel [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 22-26.

[7] 李济波, 吴晓军, 王红星, 等. 紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030601.
LI J B, WU X J, WANG H X, et al. Anti-interference relay link method and power requirement analysis for UV non-direct vision communication [J]. Laser and Opto-Electronics Progress, 2015, 52(3): 030601.

[8] ARDAKANI M H, HEIDARPOUR A R, UYSAL M. Performance analysis of relay-assisted NLOS ultraviolet communications over turbulence channels [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, DOI: 10.1364/jocn.9.000109.

[9] ALI R, MOHSAMED A, EL-MAHALLAWY M S, et al. Performance analysis of multiple NLOS UV communication cooperative relays over turbulent channels [J]. Optics Express, 2018, DOI: 10.1364/oe.26.019972.

[10] GARG K K, SINGYA P K, BHATIA V. Performance analysis of AF relayed NLOS UV communication over turbulent channel [C]. 2018 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). IEEE, 2018: 1-5.

[11] ARYA S, CHUNG Y H. Amplify-and-forward multihop non-line-of-sight ultraviolet communication in the gamma-gamma fading channel [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11 (8): 422-436.

[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] BHATNAGAR M R, ANEES S. Performance evaluation of decode-and-forward dual-hop asymmetric radio frequency-free space optical communication system [J]. *IET Optoelectronics*, 2015, 9(5):232-240.
- [14] 马雅盼,汪井源,李建华,等. 新型无线紫外光多中继协作通信网络性能研究[J]. *光电技术应用*, 2022, 37(6):82-89.
MA Y P, WANG J Y, LI J H, et al. Research on performance of a novel wireless UV-optic multi-relay cooperative communication network [J]. *Application of Optoelectronic Technology*, 2022, 37(6):82-89.
- [15] XU Z, SADLER B M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(5): 67-73.
- [16] 李晓毅,冯克涛,吴乐华,等. Gamma-Gamma 信道下紫外光近直视分集接收技术研究[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 1(1):22-29.
LI X Y, FENG K T, WU L H, et al. Research on near-direct view diversity receiving technique of ultraviolet light in Gamma-Gamma channel [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 1(1):22-29.
- [17] 邵军虎,刘晓楠,孙莹. 外差检测下 FSO/RF 混合系统中断概率研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(9):137-143.
SHAO J H, LIU X N, SUN Y. Heterodyne detection of FSO/RF hybrid system outage probability under study [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(9): 137-143.
- [18] TRINH P V, THANG T C, PHAM A T. Mixed mmWave RF/FSO relaying systems over generalized fading channels with pointing errors [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 9(1): 1-14.
- [19] 赵太飞,李永明,许杉,等. 军车隐秘编队的无线紫外光通信最优多跳中继研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(11):2636-2642.
ZHAO T F, LI Y M, XU SH, et al. Research on optimal multi-hop relay for wireless UV-Light communication in hidden formation of military vehicles [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 42(11): 2636-2642.
- [20] WANG Y, SU M Y. Analysis on the effects of atmospheric turbulence on line-of-sight ultraviolet communication system performance [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1014: 102-105.

作者简介



邵军虎, 2012 年于西安电子科技大学获得博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为信道编码调制技术。

E-mail: jhshao@xaut.edu.cn

Shao Junhu received Ph. D. degree from Xidian University in 2012. Now he is a lecturer at Xian University of Technology. His main research interests include channel coding and modulation technique.



史魏征 (通信作者), 2021 年于陕西理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为无线光通信。

E-mail: w867204901@163.com

Shi Weizheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interest includes wireless optical communication.