

OWC/RF混合通信系统研究进展

柯程虎 陈明惠 梁静远 赵黎 王惠琴 王怡 柯熙政

Research progress of OWC/RF hybrid communication system

KE Chenghu, CHEN Minghui, LIANG Jingyuan, ZHAO Li, WANG Huiqin, WANG Yi, KE Xizheng

引用本文:

柯程虎, 陈明惠, 梁静远, 等. OWC/RF混合通信系统研究进展[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 237–248. DOI: 10.5768/JAO202445.0209001

KE Chenghu, CHEN Minghui, LIANG Jingyuan, et al. Research progress of OWC/RF hybrid communication system[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 237–248. DOI: 10.5768/JAO202445.0209001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0209001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹波通信技术研究进展

Research progress on terahertz communication technology

应用光学. 2018, 39(1): 12–21 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101003>

自由空间宽谱部分相干光通信系统

Free space optical communication system based on wide-spectrum partially coherent laser

应用光学. 2019, 40(1): 157–161 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108001>

基于密集波分复用的20 Gbit/s大气激光通信

20 Gbit/s atmospheric laser communication based on dense wavelength division multiplexing

应用光学. 2017, 38(1): 136–139 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107004>

光电振荡器相位噪声和频率稳定性研究进展

Research progress on phase noise and frequency stability of optic-electronic oscillator

应用光学. 2017, 38(4): 562–568 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401008>

双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展

Research progress of double femtosecond laser frequency comb spectroscopy measurement technology

应用光学. 2021, 42(1): 157–175 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107003>

空间激光通信系统动态跟瞄参数测试方法研究

Dynamic tracking and pointing accuracy measurement method of space laser communication system

应用光学. 2018, 39(5): 762–766 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0507002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0237-12

OWC/RF 混合通信系统研究进展

柯程虎¹, 陈明惠², 梁静远², 赵黎³, 王惠琴⁴, 王怡⁵, 柯熙政^{1,2}

(1. 西安文理学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021; 4. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050;
5. 中国计量大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 无线光/射频混合通信系统克服了单一通信系统的局限性, 在最大发挥无线光通信优势的同时弥补了射频通信的不足, 显著提高了链路的可用性和可靠性, 为未来高速大容量的信息传输提供了独特的解决方案。对近年来无线光/射频混合通信系统的研究进展进行了综述, 首先介绍了不同混合通信系统模型的工作原理与应用, 然后讨论了混合通信系统所面临的挑战和解决方法, 最后展望了无线光/射频混合通信系统的未来发展趋势, 旨在为无线光/射频混合通信系统的进一步研究和发展奠定基础。

关键词: 无线光/射频混合通信; 大气湍流; 切换机制; 中继协议

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0209001

Research progress of OWC/RF hybrid communication system

KE Chenghu¹, CHEN Minghui², LIANG Jingyuan², ZHAO Li³,
WANG Huiqin⁴, WANG Yi⁵, KE Xizheng^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 4. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 5. School of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The optical wireless/radio frequency hybrid communication system compensates for the limitations of a single communication system, compensates for the shortcomings of radio frequency communication while maximizing the advantages of optical wireless communication, significantly improves the availability and reliability of the link, and provides a unique solution for future high-speed and high-capacity information transmission. The research progress of optical wireless/radio frequency hybrid communication system was reviewed in recent years, the working principles and applications of different hybrid communication system models were firstly introduced, then the challenges and solutions of the hybrid communication system were discussed, and finally the future development trend of optical wireless/radio frequency hybrid communication system was looked forward, aiming to lay the foundation for further research and development of optical wireless/radio frequency hybrid communication system.

Key words: optical wireless/radio frequency hybrid communication; atmospheric turbulence; switching mechanism; relay protocol

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-06-28

基金项目: 陕西省教育厅科研项目 (18JK0341); 陕西省重点产业创新链项目 (2017ZDCXL-GY-06-01); 西安市科技创新指导项目 (201805030YD8CG14 (12)); 西安市科技计划 (22GXFW0115)

作者简介: 柯程虎 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事无线光通信、智能微电网协调控制技术研究。E-mail: chenghuke@xawlu.edu.cn

通信作者: 柯熙政 (1962—), 男, 博士, 二级教授, 主要从事无线光通信研究。E-mail: xzke@263.net

引言

无线光通信^[1](optical wireless communication, OWC)以光作为载波在空间中传输,具有高速率、大容量、保密性强以及无需频谱许可等优点,近年来受到了人们的广泛关注。但 OWC 通信受大气湍流、天气状况(如雾和雪等)和指向误差影响较大,对雨和多径衰落并不敏感^[2]。而射频通信(radio frequency, RF)主要受雨和多径衰落的影响,对湍流、指向误差、雪和雾天气不敏感^[3],正好与 OWC 通信互补,OWC/RF 混合通信应运而生。

OWC/RF 混合通信系统融合了 OWC 通信和 RF 通信的优点,能够在信道条件高度可变的情况下,提供比单一通信系统更高的可靠性和可用性,满足未来信息传输大容量、高速率、长距离、安全可靠的要求,是无线光通信的重要发展方向。

1 国内外研究进展

OWC/RF 混合通信系统是一种解决恶劣大气和天气对无线通信系统不良影响的新型方案。根据 OWC 通信与 RF 通信对天气和大气的敏感程度不同,采用 OWC 通信系统与 RF 通信系统相结合的方式,将两种优势互补的通信系统组成 OWC/RF 混合通信系统,以提高系统的可靠性,实现端到端之间的高质量通信。

1.1 国外研究进展

2009 年, SCHÖBER R 等人^[4]针对无法获得信道状态信息的问题,提出了一种新型 OWC/RF 混合系统架构,通过对 RF 和 OWC 子信道传输的比特流进行联合比特交织编码调制(bit-interleaved coded modulation, BICM),提高混合系统鲁棒性。

2009 年, NADEEM F 等人^[5]根据 OWC 链路对天气情况的高度依赖性,使用 GHz 射频链路作为备份链路和 OWC 链路组成混合网络,研究了雾、雨和雪天气对 OWC/GHz RF 混合网络的影响,从而选择出具有最佳互补特性的 GHz 射频链路,显著提高混合系统链路的可用性。

2010 年, ABDULHUSSEIN A 等人^[6]提出了在 OWC/RF 混合系统应用无速率编码的自动请求重传(automatic repeat request, ARQ)方案,无论 OWC 或 RF 信道条件如何变化,该方案都可以充分利用可用的 OWC 和 RF 信道资源,且无需在发射端进行先验速率选择。

2011 年, LEE E 等人^[7]研究了非对称双跳中继

OWC/RF 混合系统的性能,中继节点采用副载波强度调制,将接收到的射频信号转换为光信号。仿真结果表明,随着信噪比的增加,该混合 OWC/RF 链路中断性能无限接近 RF/RF 链路。

2013 年, ANSARI I S 等人^[8]对具有指向误差的 OWC/RF 混合通信系统进行了分析,推导出了该混合系统平均误码率的表达式。仿真结果表明,增大指向误差会导致系统误码性能恶化。

2014 年, USMAN M 等人^[9]研究了基于硬切换技术的 OWC/RF 混合通信系统,比较了单 OWC 阈值和双 OWC 阈值两种情况下混合通信系统的性能。数值仿真表明,双 OWC 阈值切换方案不仅能实现与单 OWC 阈值相近的性能水平,而且可以避免频繁切换链路,可延长 OWC 链路寿命。

2016 年, TOUATI A 等人^[10]研究了联合衰落对混合 OWC/RF 链路的影响。实验结果表明,在强湍流或低信噪比情况下,OWC/RF 混合系统性能明显优于单独的 OWC,可以有效克服 OWC 链路的缺点。

2017 年, HASNA M O 等人^[11]考虑实际通信环境,提出了一种自适应高效的 OWC/RF 混合通信系统,该系统可将多个 RF 用户复用到单个高速 OWC 链路,进而实现更高的系统容量。同时证明了在低信噪比条件下,应用多用户分集只能略微提高系统性能。

2019 年, AMIRABADI M 等人^[12]提出了一种新型的 OWC/RF 混合系统模型,在并行单跳 OWC/RF 混合系统中使用接收分集技术。仿真结果表明,该方法能够显著提高 OWC/RF 混合系统中断性能,降低系统功耗,但这是以提高接收机复杂度为代价。

2019 年, ESMAIL M A 等人^[13]对 5G 应用的全光 OWC/RF 混合通信链路在恶劣沙尘条件下进行了实验评估。实验结果表明,RF 链路在密集沙尘环境中通信性能良好,而 OWC 链路会面临通信中断,证明了 OWC/RF 并行链路是克服尘埃效应的可行方案。

2020 年, ASHRAFZADEH B 等人^[14]为解决城市环境中阻塞和非视距传输的问题,缓解湍流引起的衰落效应,构建了一种新型混合三跳中继 RF-OWC-OWC 系统。但由于该系统的中继节点必须配备部分或完整的 OWC 收发器,显著增加了系统的复杂性。

2021 年, KHAN M N 等人^[15]分析了不同天气条件下的自适应 OWC/RF 混合系统, 通过自适应调制和功率分配, 自适应 OWC/RF 混合系统在最小功率水平下可以实现 1 dB 以上的性能增益, 并且能够适应变化的天气条件。

2022 年, VISHWAKARMA N 等人^[16]研究了采用自适应合并切换方案的 OWC/RF 混合系统的遍历容量, 并通过确定最佳切换阈值和波束宽度值, 获得了自适应合并系统的最佳遍历容量。数值结果表明, 基于自适应合并的 OWC/RF 混合系统的遍历容量性能优于基于最大比合并和硬切换的 OWC/RF 混合通信系统。

2022 年, MAGIDI S 等人^[17]分析了大气衰减和指向性误差联合影响下 OWC/RF 混合通信系统的性能。实验结果表明, 无论大气湍流的严重程度如何, 归一化抖动标准差越小, 系统中断性能越好, 使用 OWC/RF 混合链路可以将中断概率从单独 OWC 链路的 10^{-2} 量级降低到 10^{-5} 量级。

1.2 国内研究进展

2008 年, 舒芳等人^[18]研究了 OWC/RF 混合通信系统自动链路切换理论, 当天气状况恶化时, 先通过降低通信速率改善系统信噪比, 若低速的 OWC 通信系统性能仍低于设定阈值, 再切换至 RF 信道。该方法可充分利用 OWC 和 RF 链路的互补优势, 在提高系统可靠性的同时减少信道切换次数。

2009 年, 孟文^[19]证明了混合通信系统中的接收功率强度可以反映信道质量, 提出将接收功率作为链路切换的判断依据, 并将交换机中改进的处理网络冗余链路的快速生成树协议作为链路切换控制机制, 提高了混合系统的通信质量。

2010 年, 栗嘉等人^[20]针对 OWC/RF 混合通信系统提出了一种基于网络丢包率的切换机制, 该方案可以更好地反映当前链路状况, 使得混合链路可以进行实时、高效的切换, 从而保证数据的不间断传输。

2015 年, 高西齐等人^[21]为缓解多径衰落和大气湍流对 OWC/RF 混合系统的影响, 在信源处采用分集发射, 信宿采用选择合并, 而中继节点只配备一个射频接收天线和一个用于信息转发的中继孔径, 为 OWC/RF 混合通信系统的设计提供了一定的理论参考。

2016 年, 王卫东等人^[22]将多用户分集扩展到

OWC/RF 混合链路, 提出了一种由混合接入点、多个 OWC 用户和多个 RF 用户组成的点对多点混合通信系统。在每个传输模块上, 通过用户调度策略, 选择链路质量最好的用户与混合接入点进行通信。

2017 年, 赵静等人^[23]建立了孔径平滑作用下 RF/OWC 混合通信系统模型。仿真结果表明, 孔径平滑效应可以明显改善混合系统的通信性能。同年, 赵静等人^[24]还分别对固定增益中继和信道状态信息辅助中继混合系统性能进行评估, 发现后者对大气湍流更为敏感。

2017 年, 邵军虎等人^[25]针对 OWC/RF 混合通信链路组网的物理层数据可靠传输问题, 研究了软切换机制下采用低密度奇偶校验码(low-density parity check, LDPC)混合编码和脉冲位置调制(OWC 链路)/正交幅度调制(RF 链路)方案的系统性能。仿真结果表明, 所提出的软切换混合编码调制方案, 可获得 1.3 dB~8.0 dB 不等的性能增益, 提高了数据传输的可靠性。

2019 年, 易湘等人^[26]研究了 5G 云无线接入网络(cloud-radio access network, C-RAN)中, 基于解码转发的双跳 OWC/RF 混合通信系统性能, 用户通过射频链路将数据传输到远程射频单元, 射频单元作为中继系统, 将接收到的数据转发给基带单元。由于存在小尺度衰落和视距分量, 射频链路服从广义 κ - μ 阴影分布。

2020 年, 刘宏展等人^[27]将双跳 OWC/RF 混合系统引入深空通信中, 相较于传统 OWC 系统, 深空通信采用 OWC/RF 混合系统可以实现更低的误码率。且当混合系统采用混合调制方案时, 系统性能还能得到进一步提升。

2020 年, 赵尚弘等人^[28]研究了基于选择合并分集技术的 RF/OWC 混合航空通信系统性能, 该系统发射端无需反馈链路获取信道状态信息, 简化了系统设计。在高信噪比条件下, 具有接收分集的 RF/OWC 混合并行通信方案对系统误码性能的改善效果优于低阶调制。

2021 年, 吴琰等人^[29]基于副载波调制技术在大气湍流信道中的优势, 研究了考虑指向误差时, 采用 4 种不同副载波调制技术下 OWC/RF 混合系统的性能。仿真结果表明, 相比其他 3 种副载波调制技术, 基于相干二进制相移键控副载波调制技术的混合系统性能更优。

2022年,刘维等人^[30]提出毫米波 RF/多输入多输出(multiple input and multiple output, MIMO)OWC中继系统,并通过数值仿真证明了 MIMO 技术可以有效减轻因大气湍流强度增强而引起的混合中继系统性能下降,随着光通信链路收发孔径数目的增加,混合系统性能不断提高,但系统的复杂度也随之增加。

2 系统模型

2.1 OWC/RF 混合并行系统模型

在 OWC/RF 混合并行系统中,根据当前系统的通信状况选择合适的信道,是提高混合系统可靠性的关键,解决这一关键问题的方法在于设计高效的链路切换机制^[31]。目前,OWC/RF 混合并行系统的切换机制主要包括硬切换和软切换两种。

2.1.1 硬切换

基于硬切换机制的 OWC/RF 混合并行系统^[32],指同一时刻只能选择 OWC 链路和 RF 链路中的一条链路进行数据传输,通常以 OWC 链路作为主链路,RF 链路作为备份链路,其工作原理如图 1 所示。系统启动时默认使用 OWC 链路,根据 OWC 链路接收端所检测到的阈值信息,自动切换链路进行信息传输。硬切换机制的切换阈值可以根据系统信噪比、误码率和功率等进行设定^[32-35],目前大多数研究都是基于信噪比阈值。下面以信噪比阈值为例,介绍混合系统 OWC 链路单阈值和双阈值切换的工作原理。



图 1 硬切换示意图^[32]

Fig. 1 Schematic diagram of hard switching^[32]

1) 单阈值切换

设定 OWC 链路和 RF 链路的信噪比阈值分别为 γ_{th}^{OWC} 和 γ_{th}^{RF} , 单阈值混合系统的工作区域如图 2 所示。若 OWC 链路的瞬时信噪比高于阈值 γ_{th}^{OWC} (区域 1 内), 使用 OWC 链路传输信息; 若 OWC 链路的瞬时信噪比低于 γ_{th}^{OWC} , 则系统将检查 RF 链路的通信质量, 如果 RF 链路的瞬时信噪比高于阈值 γ_{th}^{RF} (区域 2 内), 则切换至 RF 链路传输信息; 若 2 条链路的瞬时信噪比都低于各自的阈值 (区域

3 内), 则通信中断。单阈值切换方案存在链路切换频繁的问题, 为降低链路切换频率, 延长链路寿命, 可以采用双阈值切换方案。

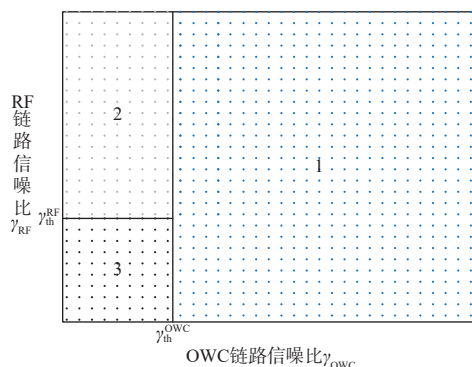


图 2 单阈值硬切换下混合系统的工作区域^[9]

Fig. 2 Working area of hybrid system under single threshold hard switching^[9]

2) 双阈值切换

双阈值切换指在 OWC 链路上设置 2 个信噪比阈值, 即 OWC 信噪比阈值上限 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ 和信噪比阈值下限 $\gamma_{th,l}^{OWC}$ ($\gamma_{th,l}^{OWC} < \gamma_{th,u}^{OWC}$), RF 链路设置一个信噪比阈值 γ_{th}^{RF} , 将 OWC/RF 混合系统信噪比值所构成的平面划分为 5 个区域, 如图 3 所示。

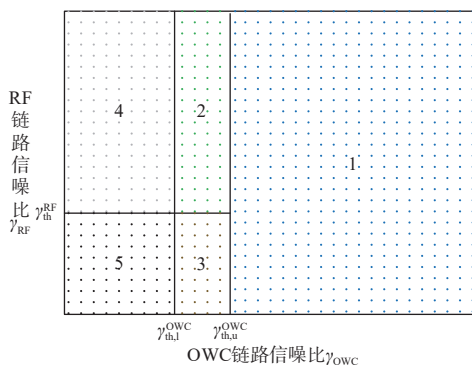


图 3 双阈值硬切换下混合系统的工作区域^[9]

Fig. 3 Working area of hybrid system under double threshold hard switching^[9]

若 OWC 链路的瞬时信噪比高于 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ (区域 1 内), 使用 OWC 链路传输信息。若 OWC 链路的瞬时信噪比在 $\gamma_{th,l}^{OWC}$ 与 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ 之间, 且 RF 链路的瞬时信噪比高于 γ_{th}^{RF} (区域 2 内), RF 链路或 OWC 链路都有可能被使用, 这取决于 OWC 链路的先前状态, 如果前一时刻 OWC 链路的瞬时信噪比高于 $\gamma_{th,u}^{OWC}$, 则由 OWC 链路传输信息, 反之则由 RF 链路传输信息。若 OWC 链路的瞬时信噪比在 $\gamma_{th,l}^{OWC}$ 与 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ 之间, 且 RF 链路的瞬时信噪比低于 γ_{th}^{RF} (区域

3 内), OWC 链路开关的概率和区域 2 相同, 但该区域 RF 链路始终保持关闭状态, 所以在区域 3 中要么使用 OWC 链路传输信息, 要么通信中断。若 OWC 链路的瞬时信噪比低于 $\gamma_{th,l}^{OWC}$, 且 RF 链路的瞬时信噪比高于 γ_{th}^{RF} (区域 4 内), 则使用 RF 链路传输。若 OWC 链路和 RF 链路的瞬时信噪比分别低于 $\gamma_{th,l}^{OWC}$ 和 γ_{th}^{RF} (区域 5 内), 则 2 条链路均处于关闭状态, 通信中断。

双阈值切换混合系统在 OWC 链路设置 2 个切换阈值, 这 2 个切换阈值之间的间隙大小直接决定链路切换的频率, $\gamma_{th,l}^{OWC}$ 与 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ 间隙越大, 链路切换频率越低^[9], 因此, 可以在保证混合系统性能的前提下, 尽可能增大 $\gamma_{th,l}^{OWC}$ 与 $\gamma_{th,u}^{OWC}$ 之间的间隙, 能够有效降低 OWC、RF 链路间切换的次数, 拓展链路的生命周期。

2.1.2 软切换

由于基于硬切换的 OWC/RF 混合并行系统在任何情况下只允许一条信道传输数据, 另一条信道则处于闲置状态, 导致带宽利用率低、信道资源浪费等问题。为了克服硬切换方案的缺点, 提出了基于软切换机制的 OWC/RF 混合并行系统^[36], 其工作原理如图 4 所示。使用一对编/译码器, 根据实时的信道状态信息对数据进行划分, 以不同数据率分配到 2 种信道中, 使得数据同时在 OWC 链路和 RF 链路上传输^[37], 提高信道资源利用率, 使得系统具有更高的信道容量。

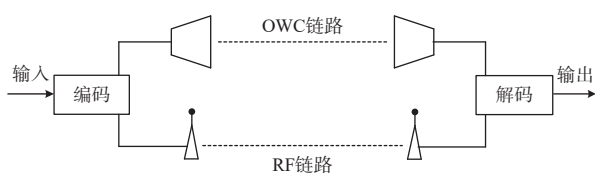


图 4 软切换示意图^[36]

Fig. 4 Schematic diagram of soft switching^[36]

2.2 OWC/RF 混合中继系统模型

OWC/RF 混合中继系统^[38]通过中继节点将信息从 RF 链路转发到 OWC 链路, 提供更广的覆盖范围。目前混合 OWC/RF 中继系统的研究主要集中在双跳混合中继系统^[23], 其中一跳使用 RF 链路传输, 另一跳使用 OWC 链路, 典型双跳混合中继系统结构如图 5^[39]所示。在源节点 S, 信源数据被调制为电信号, 经过 RF 信道传输到中继节点 R, 中继节点 R 对接收到的 RF 信号进行处理后转换为光信号, 光信号经过大气信道传输后到达目的节

点 D, 解调出原发送信息。

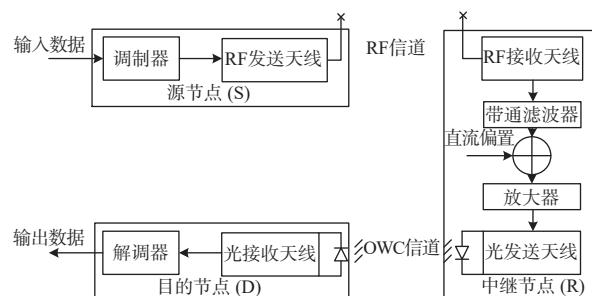


图 5 典型双跳 OWC/RF 混合中继系统结构^[39]

Fig. 5 Structure diagram of typical dual-hop OWC/RF hybrid relay system^[39]

根据中继协议的不同可将其分为放大转发中继系统和译码转发中继系统^[40-41]。在放大转发中继系统中, 中继节点 R 直接将从源节点 S 接收到的信号以某一增益进行放大并转发到目的节点 D。在译码转发中继系统中, 中继节点 R 先将从源节点 S 接收到的信号译码后, 再重新编码将处理后的信号转发到目的节点 D。由于译码转发中继系统需要对信号编码和译码, 与放大转发中继系统相比, 成本和复杂度较高, 但放大转发中继系统在对信号进行放大的同时会放大信道中的噪声, 导致系统的通信性能较差。

2.2.1 多用户混合中继系统

多用户混合中继系统^[42]示意图如图 6 所示, 源节点 S 包含 K 个移动用户, 每个用户配备单个天线, 用户和目的端之间没有直接的通信链路, 用户只能通过中继节点向目的端发送数据。

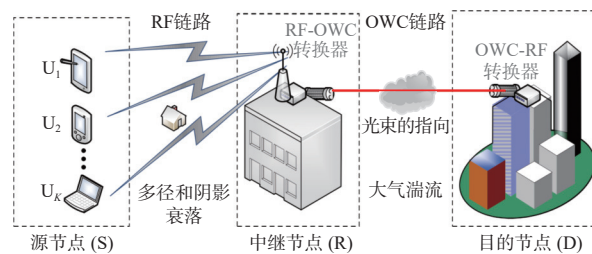


图 6 多用户双跳混合中继系统示意图^[42]

Fig. 6 Schematic diagram of multi-user dual-hop hybrid relay system^[42]

该模型包含 2 种类型的通信链路: 一是 S-R 的射频链路; 二是 R-D 的无线光通信链路。在射频链路中, 射频信号会受到多径效应和阴影效应影响; 在无线光通信链路中, 光信号主要受到大气湍流和指向误差的影响。为给 OWC 链路提供较为精准的视距连接, 光发射机和接收机一般放置在

建筑物的顶部。多用户混合中继系统可以模拟一些实际应用^[43],包括:1)蜂窝通信,移动节点将其数据发送到中继站,中继站将数据转发到基站;2)小蜂窝网络,建筑物楼层的移动节点将其数据发送到接入点,接入点将信息转发到宏基站。

2.2.2 智能反射面辅助混合中继系统

智能反射面(intelligent reflecting surfaces, IRS)^[44]是一种新型光反射器件,由大量低成本无源元件所构成。可以通过调整入射信号的振幅或相位,控制波前相位分布,将入射光束反射到任何期望的方向上。由于智能反射面的信号覆盖范围小,且不需要电源和复杂的编译码算法,使得智能反射面各元件之间不会产生相互干扰,容易集成到无线通信系统中。智能反射面辅助混合中继系统模型^[45]如图7所示,在建筑物顶层安装一个智能反射面,利用射频链路将信号从中继站反射到预定的接收器,解决了障碍物遮挡问题,确保了数据可靠和高速传输。

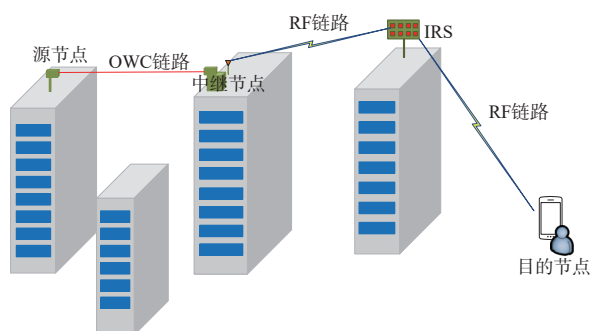


图7 智能反射面辅助混合中继系统示意图^[45]

Fig. 7 Schematic diagram of intelligent reflecting surfaces assisted hybrid relay system^[45]

3 OWC/RF 混合通信的应用场景

3.1 面向空间通信的混合系统

美国空军研究实验室开展了综合射频/光学网络战术目标组网技术(integrated RF/optical networked tactical targeting networking technologies, IRON-T2)项目^[46],证明了机载混合 OWC/RF 通信的有效性。该项目通过开发高速路由器和光学输入对终端进行适配,光学输入允许与配套的 OWC 链路终端进行交互操作,路由器设计是为了适应闪烁导致的短暂中断,射频信道用于给高数据率的 OWC 系统提供重传信号,从而实现通信系统无错传输。

德国航空航天中心(deutsches zentrum für luft-

und raumfahrt, DLR) 在 VABENE 项目^[47]中开发了一个 OWC/RF 混合系统,该系统将德国宇航中心通信与导航研究所开发的光学通信系统和遥感研究所开发的高分辨率相机传感器相结合,旨在对大规模事件和自然灾害进行监测和交通管理。并在通信与导航研究所屋顶和服务塔之间模拟演示了飞行终端和地面站通信速率为 1 Gbit/s 的下行链路。实验结果表明,小型航天器可以通过稳定的光链路提供更高的数据速率,而 RF 链路不受环境条件的影响,弥补了光通信链路的不足。

为实现长距离高数据率通信,美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)格伦研究中心设计出了一种支持深空通信的混合望远镜——Teletenna^[48],将光学技术和射频技术结合在一起,以克服工程挑战,实现了深空通信 10~100 倍的数据传输,OWC 链路和 RF 链路数据率分别高达 267 Mbit/s 和 84 Mbit/s。Teletenna 集成了共视轴望远镜和 Ka 波段射频天线,具有卡塞格林几何结构^[49],这种几何设计是为了减少深空任务中通信系统的质量。并通过隔离反射元件和光学元件,提高了系统的稳定性。

3.2 车辆通信中的混合系统

近年来,利用近地轨道卫星(low earth orbit, LEO)进行网络连接的研究日益增加,OWC/RF 混合网络在车联网最后一公里接入问题受到广泛关注^[50]。NGUYEN T K 等人^[51]建立了一个传输控制协议(transmission control protocol, TCP)性能分析模型,如图8所示。

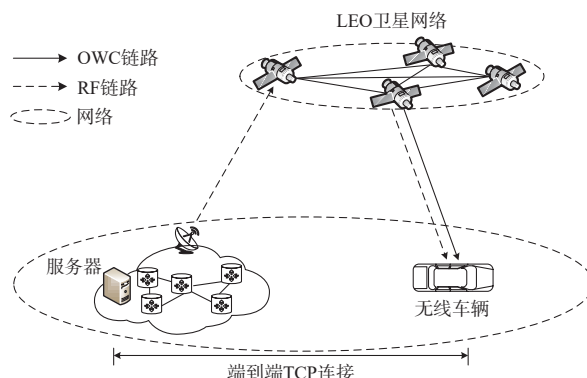


图8 车联网中最后一公里卫星互联网接入场景^[51]

Fig. 8 Last mile satellite internet access scenario in vehicle networking^[51]

考虑一个端到端网络场景,其中车辆通过 LEO 卫星互联网接入,从远程服务器(TCP 源)下载数据。系统物理层包括 OWC 链路和 RF 链路,

为改善物理层的误码性能,这2种链路都采用里德-所罗门码(Reed-Solomon, RS)进行信道编码。链路层通过选择重复自动重传请求方案,重新发送错误帧以保证数据的可靠传输。

在混合 OWC/RF 车辆自组网络中,中国科学技术大学龚辰等人^[52]采用分布式信道分配和速率控制来解决跨层设计问题,实现网络吞吐量最大化。由于车辆通信的信道资源有限,为保证服务质量,所提出的信道分配算法通过对测量链路的信道需求进行线性规划,以此决定信道的使用情况,算法收敛速度较快,再利用交替方向乘子法进行速率调整,控制每条路径上的传输速率。

CHOWDHURY M Z 等人^[53]通过以下3个场景证明了 OWC/RF 混合通信可用于提高 V2V(vehicle-to-vehicle)通信的可靠性:1)雾天出现交通事故时,由于后车的光接收机无法检测到光信号,因此

前车无法将事故信息传输给后车,在这种情况下车辆之间可以使用 RF 链路进行通信;2)OWC 支持车辆间的长距离通信,当两车之间的距离较长,超出 RF 通信范围,可切换至 OWC 链路;3)当前方车辆左转向或右转向时,信号会发生非视距传输的情况,无线光通信链路中断,此时使用 RF 通信可以提供更好的连接。

3.3 水下通信中的混合系统

水下无线通信主要依靠声学、RF 和光学3种手段实现^[54],比较3种水下无线通信技术的优缺点如表1所示。从表1中可以看出,水下光通信具有高速率、高保密性、低延迟、低成本等优点,但无法用于非视距传输,系统性能受海水吸收和散射、信道湍流等影响较大,正好与 RF 和水声通信互补。因此,在水下通信系统中采用混合通信方案可以克服单一通信系统的限制。

表 1 3 种水下无线通信技术的差异

Table 1 Differences among three underwater wireless communication technologies

参数	RF	声学	水下光通信
频率	30 Hz~300 Hz或MHz范围内	10 kHz~15 kHz	10^{12} Hz~ 10^{15} Hz
发射功率	几毫瓦特到数百瓦特范围内	通常为几十瓦特	几瓦特
数据率	Mbit/s范围	Kbit/s范围	Gbit/s
传输距离	≤ 10 m	≤ 20 km	10 m~100 m
性能参数	电导率,介电常数	温度,盐度,压强	吸收,散射,浊度,有机物
传输时延	中	高	低
衰减	3.5 dB/m~5 dB/m	0.1 dB/km~4 dB/km	0.39 dB/m~11 dB/m
视距/非视距	都适用	都适用	只适用视距

MOHSAN S A H 等人^[55]为实现自主式水下航行器与基站间的实时视频监控,对水声/光混合无线通信系统进行了研究。该系统配备了光学和声学调制解调器,通过提供带宽和连接需求发挥2种通信方式的优势。此外,还配备了额外的声学接收器以提高通信冗余度,同时提供额外数据来定位另一个发射器,并对准光学调制解调器。在对准过程中,数据通过声学链路发送,直到光学调制解调器精确对准。当光学调制解调器对准时,视频数据使用光学链路发送,以此增加系统带宽。即使在光学链路不可用情况下,声学链路仍保持工作交换控制信号和发送视频帧。这种混合声/光系统可以动态配置,保持高速光链路。

NAIK R P 等人^[56]鉴于可重构智能表面在 RF 链路和 OWC 链路中的优势,将可重构智能表面的

概念引入水下无线通信系统。可重构智能表面是一种无放大作用的全双工中继,其平面上集成了大量无源反射元件,可以将入射信号向期望方向进行反射,在通信速率和复杂度方面优于传统中继系统(如放大转发和解码转发)。通过下沉物在水下放置 M 个不同位置的可重构智能表面,解决由于水下障碍物遮挡造成的光链路非视距传输问题,且增加可重构智能表面数量可以改善水下 OWC/RF 混合系统的平均信噪比。

3.4 5G 回传中的混合系统

在 5G 通信中,超密集和高流量小区通过回传链路连接到核心网络,但通常在容量、延迟、可用性和成本方面有着极高的要求。为解决 5G 回传问题,JABER M 等人^[57]提出了 5G 云无线接入网络(cloud radio access network, C-RAN),其网络架构

如图 9 所示。在 5G C-RAN 的上行链路中,用户通过 RF 链路向远程无线电单元(remote radio unit, RRU)发送数据,RRU 作为中继将接收到的数据通过 OWC 链路转发给基带单元(baseband unit, BBU)。采用 C-RAN 网络架构可以在提高基础设施利用率的同时,减少能源消耗,促进了 5G 的绿色发展。

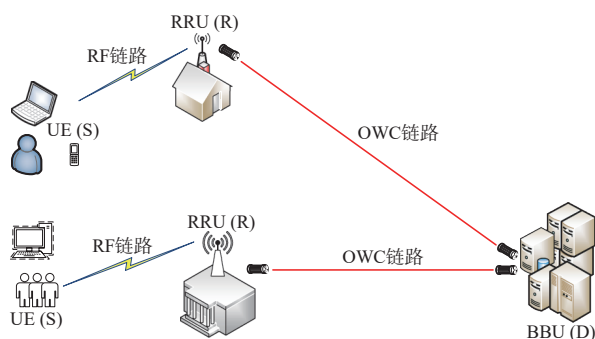


图 9 5G 云无线接入网络中的 OWC/RF 混合通信^[57]
Fig. 9 OWC/RF hybrid communication in 5G cloud radio access network^[57]

美国雷神公司与 NxGen 公司^[58]合作开发了一款低成本和高带宽的 5G 回传应用,使用多个轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)模式对正交和独立的光信道进行复用和解复用,提高链路吞吐量,并在 RF 全双工回传链路中创建隔离。利用 OAM 技术将 RF 链路和 OWC 链路进行同轴封装,提供了一种高频谱效率的无线回传链路,与光纤回传相比,基于混合 OWC/RF 配置的无线回传链路延迟较低,即使在恶劣天气下也能发挥作用,满足现代电信网络的可用性和可靠性要求。

4 面临问题与挑战

4.1 天气状况

以 40 GHz 射频/OWC 混合通信为例^[5],表 2 给出了不同天气对通信链路的影响。从表 2 中可以看出,OWC 链路受天气影响较大,在雪、雾等天气下,OWC 链路可用性和可靠性无法保证,而 RF 链路对雨很敏感,在这种情况下,混合通信成为解决这些挑战的可行方案。频率选择对于混合系统至关重要^[59],频率过高会导致信号衰减严重,传输距离大幅度降低;频率过低,信号波长较长,容易发生衍射现象,出现干扰。RF 链路的频率与天气条件、通信速率等因素密切相关,通过了解链路衰减情况,选择合适的频率可以有效降低天气对混合 OWC/RF 通信系统性能的影响。

表 2 不同天气下 40 GHz 射频链路和 OWC 链路的可用性^[5]
Table 2 Availability of 40 GHz RF links and OWC links in different weather conditions^[5] %

天气状况	RF(40 GHz)	OWC	混合
雪	100	39.49	100
浓雾	100	0.51	100
雨	14.29	85.71	85.71

4.2 大气湍流

在混合通信系统中,OWC 链路所产生的激光束经过大气信道传输后,受大气湍流影响,会导致光强闪烁、光束漂移与扩展等现象^[60-61],使得混合系统的可靠性降低。为解决湍流效应所造成的不利影响,保证混合通信系统 OWC 链路正常工作,可以通过以下措施解决:1) 对于近距离通信,一般采用自适应光学技术(adaptive optic, AO)进行补偿^[62],受天线孔径、链路带宽等因素限制,AO 系统的作用距离在非涅尔区域内,当超过该区域,产生的相差无法再通过接收端与发射端的天线进行自适应相位补偿;2) 对于远距离通信,可以采用自动增益控制技术补偿^[63],在接收端通过反馈电路调整增益保持输出信号的稳定,改善系统性能。

4.3 指向误差

OWC 链路要求光发射机与光接收机之间严格对准,这样才能建立可靠连接。但在实际中,由于风载荷、热膨胀和建筑物摇晃等因素,导致光束偏离原来方向,收发机之间必然存在指向误差^[64]。由于接收孔径有限,如果指向误差过大,接收端无法检测到光信号,导致通信中断。为减轻指向误差对 OWC 性能产生的不利影响^[65],一方面可以采用光束宽度优化,通过 OWC 系统传输孔径控制光束宽度,以实现最小的几何损失和错误概率;另一方面由于 RF 链路不容易出现指向误差,可利用毫米波 RF 链路作为主要数据传输链路,降低指向误差对混合通信系统的影响,但这种情况下系统的通信数据率也会降低。

4.4 多径效应

在 RF 通信链路中,电磁波在信道中传播时,遇到物体反射造成信号从不同路径到达接收机,形成多径效应^[66]。由于传播路径不同,不同路径到达接收机的时间也不同,各分量按各自相位相互叠加产生干扰,导致信号失真,同时多径效应还会导致信号衰落。判决反馈均衡器可以减少多径效应对混合通信系统所带来的影响^[67],该均衡器主要

由前馈滤波器和反馈滤波器组成, 是一种限制长度的 RAKE 接收机, 使用信号与干扰加噪声的比值度量信号质量, 通过消除前馈部分的线性干扰可以解决后续多径时延带来的码间串扰。采用多径分集接收技术可以从时间上分辨出细微的多径信号, 对分辨出的多径信号分别进行加权调整, 复合成加强信号, 既能解决干扰问题, 又能增强有效信号。

5 总结与展望

作为无线光通信领域的重要研究方向, 混合 OWC/RF 通信结合 OWC 和 RF 两种通信方式的优势, 既克服了 OWC 链路性能易受天气影响的问题, 又解决了 RF 链路通信速率受限的问题, 在兼顾通信速率的同时提高了系统可靠性。为移动通信最后一公里接入提供解决方案, 在水下、无人机、卫星和 5G 等通信中都具有广阔的应用前景^[68-70]。

本文阐述了近 15 年内混合 OWC/RF 通信系统的发展概况, 介绍了 2 种主要的混合通信系统模型, 对不同应用场景中的混合通信系统进行讨论, 在此基础上分析了混合通信所面临的问题与挑战, 指出了解决这些问题的关键技术, 并对混合 OWC/RF 通信的发展趋势进行展望, 主要包括以下几个方面:

1) 改进混合 OWC/RF 并行通信系统的自适应切换算法, 在降低链路切换次数的同时, 使得混合系统性能达到最佳;

2) 鉴于实际混合通信中无线信道的不对称性, 研究混合调制编码技术, 可以提高混合系统的可靠性和资源(如功率、带宽、预算等)利用率;

3) 研究空间信息网中的混合通信系统, 提高空间信息网的覆盖范围以及实时信息处理能力, 从而构建一个互联互通的空天地一体化信息通信网络, 实现空间信息资源利用率的最大化;

4) 研究 5G 回传设计中的混合通信系统, 解决网络拥塞、延迟等问题, 从而加快 5G+ 和 6G 的建设。

参考文献:

- [1] HAMZA A S, DEOGUN J S, ALEXANDER D R. Classification framework for free space optical communication links and systems[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 21(2): 1346-1382.
- [2] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [3] KHALID H, MUHAMMAD S S, NISTAZAKIS H E, et al. Performance analysis of hard-switching based hybrid FSO/RF system over turbulence channels[J]. *Computation*, 2019, 7(2): 28-38.
- [4] HE B, SCHÖBER R. Bit-interleaved coded modulation for hybrid RF/FSO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(12): 3753-3763.
- [5] 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.
- [6] ABDULHUSSEIN A, OKA A, NGUYEN T T, et al. Rateless coding for hybrid free-space optical and radio-frequency communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 907-913.
- [7] LEE E, PARK J, HAN D, et al. Performance analysis of the asymmetric dual-hop relay transmission with mixed RF/FSO links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1642-1644.
- [8] ANSARI I S, YILMAZ F, ALOUINI M S. Impact of pointing errors on the performance of mixed RF/FSO dual-hop transmission systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(3): 351-354.
- [9] USMAN M, YANG H C, ALOUINI M S. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 1-13.
- [10] 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.
- [11] YANG L, HASNA M O, ANSARI I S. Unified performance analysis for multiuser mixed η - μ and M -distribution dual-hop RF/FSO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(8): 3601-3613.
- [12] AMIRABADI M A, VAKILI V T. A novel hybrid FSO/RF communication system with receive diversity[J]. *Optik*, 2019, 184(3): 293-298.
- [13] ESMAIL M A, RAGHEB A M, FATHALLAH H A, et al. 5G-28 GHz signal transmission over hybrid all-optical

- FSO/RF link in dusty weather conditions[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(2): 24404-24410.
- [14] ASHRAFZADEH B, SOLEIMANI N E, ZAIMBASHI A, et al. Outage performance of mixed RF-FSO systems over DGG and Nakagami-m channels[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(12): 2135-2139.
- [15] KHAN M N, KASHIF H, RAFAY A. Performance and optimization of hybrid FSO/RF communication system in varying weather[J]. *Photonic Network Communications*, 2021, 41(1): 47-56.
- [16] VISHWAKARMA N, SWAMINATHAN R. On the capacity performance of hybrid FSO/RF system with adaptive combining over generalized distributions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 1-12.
- [17] MAGIDI S, JABEENA A. Analysis of hybrid FSO/RF communication system under the effects of combined atmospheric fading and pointing errors[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(4): 1-20.
- [18] 舒芳, 敖发良, 廖新鼎. 混合FSO/RF系统自动切换条件的研究[J]. 桂林电子科技大学学报, 2008, 94(1): 1-4.
SHU Fang, AO Faliang, LIAO Xinding. Research on automatic switching conditions of hybrid FSO/RF system[J]. *Journal Of Guilin University Of Electronic Technology*, 2008, 94(1): 1-4.
- [19] 孟文. 无线激光/微波双链路通信控制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
MENG Wen. Wireless laser/microwave dual-link communication control technology research[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [20] 粟嘉, 陈辉. 基于网络丢包率的混合FSO/RF系统切换技术研究[J]. 光通信技术, 2011, 35(10): 28-31.
SU Jia, CHEN Hui. Research on hybrid FSO/RF system switching technology based on network packet loss rate[J]. *Optical Communication Technique*, 2011, 35(10): 28-31.
- [21] YANG L, HASNA M O, GAO X. Performance of mixed RF/FSO with variable gain over generalized atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(9): 1913-1924.
- [22] CHEN L, WANG W, ZHANG C. Multiuser diversity over parallel and hybrid FSO/RF links and its performance analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-9.
- [23] 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): 176-184.
- ZHAO Jing, ZHAO Shanghong, ZHAO Weihu, et al. Performance analysis of hybrid RF/FSO aerial communication systems under atmospheric turbulence and pointing errors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 176-184.
- [24] ZHAO J, ZHAO S H, ZHAO W H, et al. Performance of mixed RF/FSO systems in exponentiated Weibull distributed channels[J]. *Optics Communications*, 2017, 405(7): 244-252.
- [25] 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.
SHAO Junhu, SU Runmin, YAO Liu, et al. Performance analysis of soft-switching FSO/RF link hybrid coding and modulation algorithm[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(5): 682-687.
- [26] YI X, SHEN C, YUE P, et al. Performance of decode-and-forward mixed RF/FSO system over κ - μ shadowed and exponentiated Weibull fading[J]. *Optics Communications*, 2019, 439(1): 103-111.
- [27] 刘宏展, 姜婷, 郝源. 利用混合RF-FSO系统改善深空通信的研究[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 148-155.
LIU Hongzhan, JIANG Ting, HAO Yuan. Research on improving deep space communication using hybrid RF-FSO system[J]. *Journal of Communication*, 2020, 41(10): 148-155.
- [28] 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 Wenya, ZHAO Shanghong, WANG Xiang, et al. Performance analysis of hybrid FSO/RF aerial communication system based on SC diversity[J]. *Laser and Infrared*, 2020, 50(5): 525-531.
- [29] 吴琰, 梅海平, 戴聪明, 等. 混合自由空间光/射频通信系统的性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 203-209.
WU Yan, MEI Haiping, DAI Congming, et al. Performance analysis of hybrid free space optical/RF communication system[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2021, 58(17): 203-209.
- [30] 刘维, 王静怡, 马鑫洋, 等. 混合毫米波射频/多输入多输出-自由空间光通信中继系统[J]. 光学精密工程, 2022, 30(5): 536-544.
LIU Wei, WANG Jingyi, MA Xinyang, et al. Hybrid millimeter-wave radio frequency/ multiple input multiple output free space optical communication relay system[J].

- Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(5): 536-544.
- [31] 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): 49-64.
- DING Liang, WU Zhiyong, GU Yucong, et al. Key technologies for wireless laser and RF complementary communication systems[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2019, 56(6): 49-64.
- [32] WU Y, YANG Q, PARK D, et al. Dynamic link selection and power allocation with reliability guarantees for hybrid FSO/RF systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 13654-13664.
- [33] MAI V V, PHAM A T. Adaptive multi-rate designs for hybrid FSO/RF systems over fading channels[C]//2014 IEEE Globecom Workshops. Austin: IEEE, 2014: 469-474.
- [34] NADEEM F, GEIGER B, LEITGEB E, et al. Comparison of link selection algorithms for free space optics/radio frequency hybrid network[J]. *IET Communications*, 2011, 5(18): 2751-2759.
- [35] VISHWAKARMA N, SWAMINATHAN R. Performance analysis of hybrid FSO/RF communication over generalized fading models[J]. *Optics Communications*, 2021, 487: 126796-126813.
- [36] ZHANG W, HRANILOVIC S, SHI C. Soft-switching hybrid FSO/RF links using short-length raptor codes: design and implementation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1698-1708.
- [37] ESLAMI A, VANGALA S, PISHRO-NIK H. Hybrid channel codes for efficient FSO/RF communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(10): 2926-2938.
- [38] BAG B, DAS A, ANSARI I S, et al. Performance analysis of hybrid FSO systems using FSO/RF-FSO link adaptation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1-17.
- [39] MIRIDAKIS N I, MATTHAIIOU M, KARAGIANNIDIS G K. Multiuser relaying over mixed RF/FSO links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(5): 1634-1645.
- [40] WANG Y, WANG P, LIU X, et al. On the performance of dual-hop mixed RF/FSO wireless communication system in urban area over aggregated exponentiated Weibull fading channels with pointing errors[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 609-616.
- [41] 韩立强, 江红兵. 双跳混合RF/MIMO FSO放大转发中继通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 1-10.
- HAN Liqiang, JIANG Hongbing. Performance analysis of a two-hop hybrid RF/MIMO FSO amplify-and-forward relay communication system[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2020, 57(13): 1-10.
- [42] 敖青青. 多用户的双跳混合RF/FSO系统性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- AO Qingqing. Performance study of multi-user dual-hop hybrid RF/FSO system[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [43] JAMALI V, MICHALOPOULOS D S, UYSAL M, et al. Link allocation for multiuser systems with hybrid RF/FSO backhaul: Delay-limited and delay-tolerant designs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3281-3295.
- [44] NAJAFI M, SCHMAUSS B, SCHÖBER R. Intelligent reflecting surfaces for free space optical communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6134-6151.
- [45] YANG L, GUO W, ANSARI I S. Mixed dual-hop FSO-RF communication systems through reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(7): 1558-1562.
- [46] STOTTS L B, ANDREWS L C, CHERRY P C, et al. Hybrid optical RF airborne communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1109-1127.
- [47] RÖDIGER B, GINTHÖR D, LABRADOR J P, et al. Demonstration of an FSO/RF hybrid-communication system on aeronautical and space applications[C]//Conference on Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans. United States: SPIE, 2020: 1-11.
- [48] MOHSAN S A H, AMJAD H. A comprehensive survey on hybrid wireless networks: practical considerations, challenges, applications and research directions[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(9): 1-56.
- [49] 梁静远, 亢维龙, 董壮, 等. 自由空间光通信系统光学天线技术研究进展[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 1-10.
- LIANG Jingyuan, KANG Weilong, DONG Zhuang, et al. Research progress of optical antenna technology for free-space optical communication system[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(4): 1-10.
- [50] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.
- KE Xizheng, QIN Huanhuan, YANG Shangjun, et al.

- Nighttime background light noise model for vehicle network visible light communication system[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(6): 986-990.
- [51] NGUYEN T K, NGUYEN C T, LE H D, et al. TCP performance over satellite-based hybrid FSO/RF vehicular networks: Modeling and analysis[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 108426-108440.
- [52] ZHOU K, GONG C, WU N, et al. Distributed channel allocation and rate control for hybrid FSO/RF vehicular ad hoc networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(8): 669-681.
- [53] CHOWDHURY M Z, HOSSAN M T, HASAN M K, et al. Integrated RF/optical wireless networks for improving QoS in indoor and transportation applications[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 107(3): 1401-1430.
- [54] CHOWDHURY M Z, HASAN M K, SHAHJALAL M, et al. Optical wireless hybrid networks: Trends, opportunities, challenges, and research directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 930-966.
- [55] MOHSAN S A H, HASAN M M, MAZINANI A, et al. A systematic review on practical considerations, recent advances and research challenges in underwater optical wireless communication[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020, 11(7): 1-11.
- [56] NAIK R P, CHUNG W Y. Evaluation of reconfigurable intelligent surface-assisted underwater wireless optical communication system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(13): 4257-4267.
- [57] JABER M, IMRAN M A, TAFAZOLLI R, et al. 5G backhaul challenges and emerging research directions: A survey[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1743-1766.
- [58] GRACEFFO G M, TALAMONTI J, CAMPBELL L, et al. Hybrid RF & FSO for defense and 5G backhaul[C]//2019 IEEE Globecom Workshops. Waikoloa: IEEE, 2019: 1-6.
- [59] OGUCHI T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(9): 1029-1078.
- [60] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型的研究与展望[J]. *光通信技术*, 2022, 46(12): 1-13.
- LI Zheng, LIAO Zhiwen, LIANG Jingyuan, et al. Research and prospects of atmospheric turbulence model[J]. *Optical Communication Technology*, 2022, 46(12): 1-13.
- [61] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 323-339.
- KE Xizheng, WU Jiali, YANG Shangjun. Progress and prospects of atmospheric turbulence research for wireless optical communication[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(3): 323-339.
- [62] 柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(8): 30-52.
- KE Xizheng, YANG Shangjun, WU Jiali, et al. Research progress of adaptive optics for wireless optical communication system at Xi'an University of Technology[J]. *Intense Lasers and Particle Beams*, 2021, 33(8): 30-52.
- [63] KITAMURA K, MASUDA H. First experimental demonstration of all-optical feedforward automatic gain control scheme using a semiconductor optical amplifier[J]. *IEICE Electronics Express*, 2019, 16(4): 1-6.
- [64] SHARMA S, MADHUKUMARA S, SWAMINATHAN R. Effect of pointing errors on the performance of hybrid FSO/RF networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 131418-131434.
- [65] MOHSAN S A H, KHAN M A, AMJAD H. Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges[J]. *Optical Switching and Networking*, 2022, 47: 100697-100713.
- [66] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 105-112.
- KE Xizheng, DENG Lijun. *Optical wireless communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 105-112.
- [67] BAGLEY Z C, HUGHES D H, JUAREZ J C, et al. Hybrid optical radio frequency airborne communications[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(5): 0550061-05500625.
- [68] 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(3): 3-21.
- KE Xizheng, LIANG Jingyuan, XU Dongsheng, et al. Research progress of pulse position modulation technology for wireless optical communication class[J]. *Photovoltaic Engineering*, 2022, 49(3): 3-21.
- [69] XU G, SONG Z. Effects of solar scintillation on deep space communications: challenges and prediction techniques[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 10-16.
- [70] BAHA M A M, ALSAIFY A, ALMA'AITAH A Y. Innovative unmanned aerial vehicle self-backhauling hybrid solution using RF/FSO system for 5G networks[J]. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 2022, 12(4): 4483-4506.