

智能微波光子射频 前端与链路

Intelligent Microwave Photonic RF Frontends and Links



邹喜华 / ZOU Xihua, 李沛轩 / LI Peixuan, 刘丰玮 / LIU Fengwei

(西南交通大学, 四川 成都 611756)
(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

摘要: 射频 (RF) 前端与链路是雷达、通信、电子战等系统中的核心功能模块。新一代智能无线系统的大带宽、多频段、可重构信号处理与传输需求对 RF 前端与链路的研发提出一系列挑战。基于微波光子技术的 RF 前端与链路具有大带宽、低损耗和抗电磁干扰等优势, 能够很好地满足新一代智能无线系统的需求。重点围绕可重构、多信道 / 阵列化收发 RF 前端和大动态范围、高相位稳定性、多业务融合的微波光子 RF 链路, 介绍与分析智能微波光子射频前端与链路的发展现状与研究动态。

关键词: 微波光子; RF 前端与链路; 智能 RF 系统

Abstract: Radiofrequency (RF) frontends and links are the key modules for microwave systems like radar, communication, and electronic warfare. The requirements of new-generation intelligent RF system on broad bandwidth, multi-band spectra and reconfigurability bring new challenges to the development of RF frontends and links. Both RF frontends and RF links assisted by the microwave photonics can provide a very promising solution to address above challenges with advantages of broadband, low loss and immunity to electromagnetic interference. In this paper, a comprehensive overview to the intelligent microwave photonic RF frontends and links is presented, focusing on reconfigurable, multi-channel/channelized transceiver frontends and microwave links featuring large dynamic range, high phase stability and multi-service convergence.

Keywords: microwave photonics; RF frontend and link; intelligent RF system

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200409.1700.004.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-19

随着新一代信息技术的不断发展演进, 各种不同频段、制式的通信标准和无线业务不断涌现, 导致无线系统的多样性与异构性越来越明显, 主要表现为: 多种不同通信制式、标准共存, 例如, 已经开始商用的 5G、

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB2203204)、国家自然科学基金 (61922069)、国家“863”计划课题 (2015AA016903)、四川省科技计划资助 (2019JDJQ0022, 2018HH0002)

目前主流的 4G 以及拥有一定用户存量的 3G 和 2G; 各种不同功能的无线业务共存, 例如, 无线局域网、蓝牙、北斗和全球定位系统 (GPS) 导航等; 不同频段射频信号共存, 覆盖几十兆赫兹的微波到几十吉赫兹的毫米波甚至太赫兹波。在此背景下, 无线系统不断朝着智能化方向发展, 一方面能够进行宽带多频段、多功能、多标准信号的无缝兼容与融合; 另一方面具

有灵活可重构特性, 可根据系统功能、服务对象、应用场景进行不同频段、标准无线信号的切换与优化组合, 以达到资源利用最大化。

射频前端与链路是无线系统的基础组成部分, 承担着无线信号的收发处理与传输等关键任务; 因此, 发展具有大带宽、多频段以及可重构特性的智能射频前端与链路对无线系统的进一步演进至关重要。现有基于传统

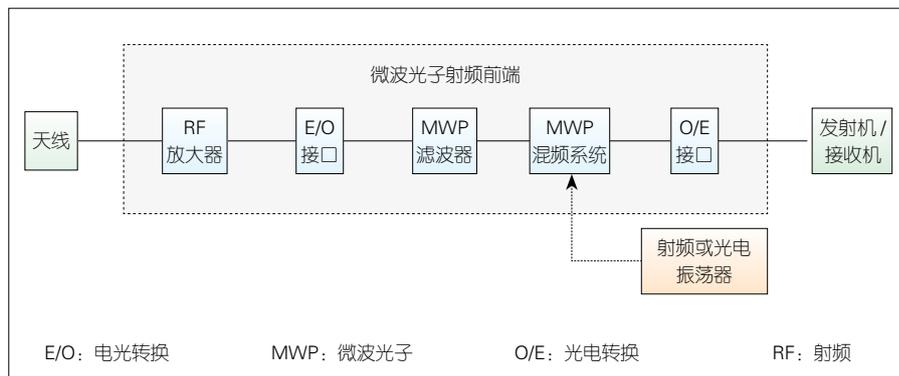
电子技术的射频前端与链路存在着高频损耗大、带宽窄、处理速度低等诸多瓶颈问题，难以满足无线系统的智能化发展需求。近些年来，微波光子学的快速兴起、成熟为上述问题的解决提供了新的方法和思路。微波光子系统将传统电子学难以处理的高频、宽带微波信号调制到光域上，借助于光子学器件或者技术的低损耗、大带宽以及抗电磁干扰等本征优势进行宽带、高频微波信号的产生、传输、处理、检测和控制等^[1]。微波光子技术能够有效缓解传统电子学技术在处理和传输高频段、大带宽、动态时变微波信号时所面临的困境；因此，满足宽带、多频段以及可重构等特性的微波光子智能射频前端与链路是近些年来微波射频器件研究的热点。

1 智能微波光子射频前端

射频前端位于无线系统最前端，负责连接收发机与天线，是整个系统性能好坏的决定性因素之一。随着 5G 移动通信及物联网的应用部署，以及为满足现代电子战中雷达的高性能需求，射频前端需要处理的信号不断变得更加复杂，向着超高频、多种调制格式、多频段、多波束收发和多点无线资源协同等智能化方向发展。然而，由于不同频段使用的电子元件截然不同，电子射频前端难以通过堆叠射频模块来实现跨多波段甚至全通信波段的可调谐和可重构功能；因此，具有可调谐可重构优点的宽带微波光子射频前端应运而生，并日益发展壮大。

1.1 可重构收发射频前端

微波光子收发射频前端主要结构如图 1 所示。同传统的电射频前端一样，微波光子射频前端（MPRF）需要完成信号放大、滤波、本地振荡（LO）信号产生、针对发送和接收的上下变



▲图 1 微波光子收发前端示意图

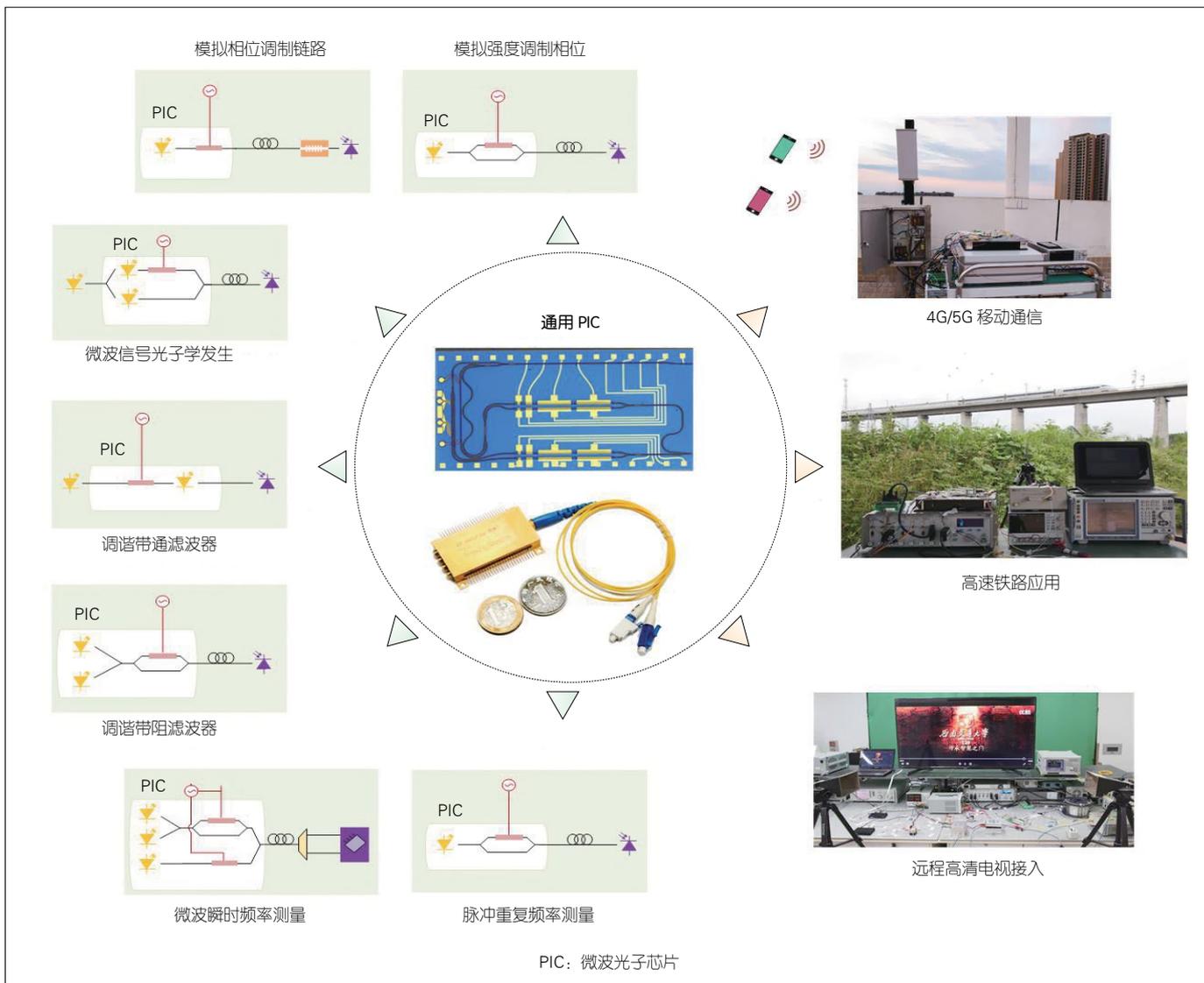
频等。而不一样的是，MPRF 一方面将射频信号变换到光域，利用微波光子技术的大带宽优势替代电子器件实现信号滤波和混频等处理功能，以兼容多频段、多制式、多功能信号；另一方面可通过光子技术产生高频、可调谐的 LO 信号。

目前，可重构 MPRF 的研究主要集中于利用微波光子混频技术的宽带优势，实现发送和接收信号的宽带可调谐上、下变频，以满足智能系统的多频段信号兼容与灵活可重构需求。美国 Vencore 实验室的研究人员针对接收射频前端，利用外调制产生光梳多频本振，在实验中将 2 ~ 18 GHz 范围的射频信号下变频至 2 GHz 中频频段^[3]。南京航空航天大学的研究人员利用外调制产生双光梳本振，研制了 S 波段到 Ka 波段的收发射频前端^[4]。意大利国家光电实验室的研究人员利用锁模激光器产生光频梳本振，实现了信号的可调谐上、下变频接收与发送，频率调谐范围为 2 ~ 18 GHz^[5]。清华大学的研究人员提出了一种基于光电振荡器（OEO）的可调谐宽带光子射频前端方案，可调谐频率范围可覆盖 X 波段到 Ka 波段^[6]。此外，该课题组还利用基于光频梳和色散介质的微波光子滤波器构造接收射频前端，在实现信号下变频接收的同时进行中频滤波，频率覆盖范围大于 20 GHz^[7]。

此外，可重构 MPRF 的芯片集成是最近兴起的热点研究方向，以提供低成本、小体积和高可靠的光子射频前端解决方案。清华大学的研究人员提出一种基于硅基集成的微波光子收发前端^[8]，利用片上相位外调制产生光本振，实现的发送信号调谐范围为 2 ~ 10 GHz，可处理的接收信号频率覆盖为 2 ~ 15 GHz。西南交通大学的团队研发了一种通用的微波光子集成芯片（PIC）^[9]，如图 2 所示。该芯片单片集成了多个可调谐的激光器、调制器和耦合器，实现微波光子链路结构和信号流向的重构，能够灵活配置，跨越微波信号产生、传输和处理 3 大核心领域实施多项功能，包括远端信号产生、强度 / 相位调制的微波光子传输链路、可调谐带通 / 带阻滤波器、微波瞬时频率测量、微波脉冲重复频率测量等。该芯片直接应用于承载室内和室外场景的日常实时业务：直接部署在成都 - 重庆（成渝）高铁线路沿线，针对电磁干扰进行监测；被嵌入到 4G/5G 无线通信系统和 4K 高清视频接入系统，支撑日常实时业务。

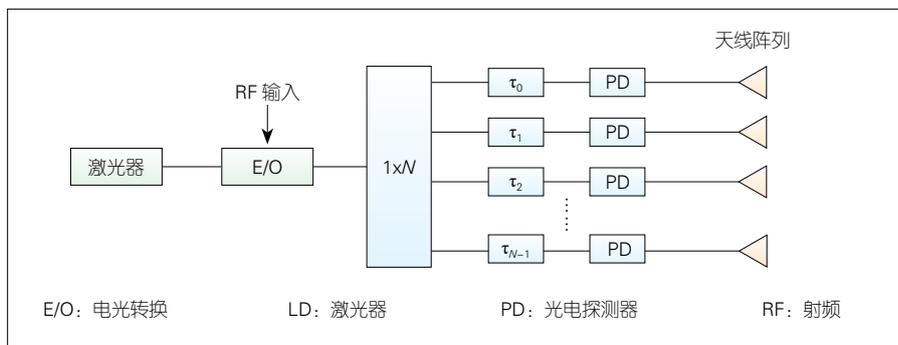
1.2 多信道 / 阵列化收发射频前端

多信道 / 阵列化收发前端分为两部分讨论：一部分是光子真时延相控阵收发前端，另一部分是宽带信号的信道化接收前端。



▲图 2 通用微波光子芯片及其应用于室内和室外场景的日常实时业务承载示意图^[10]

相控阵收发前端通过控制各个阵元幅度和相位来实现射频信号的高效定向覆盖，能够有效降低系统损耗，增加覆盖范围，降低附加干扰；因此，相控阵收发前端在雷达、无线通信等射频微波领域具有非常重要的应用。基于光子真时延的波束赋形技术因其能够充分利用光子技术的抗电磁干扰、重量轻、体积小、低损耗、高带宽等优势，有望替代现有带宽受限电子技术来满足射频智能系统的宽谱灵活覆盖需求。基于光子真时延波束赋形的阵列化收发前端基本结构如图 3 所示：



▲图 3 基于光子真时延的相控阵收发前端示意图

射频信号经电光转换至光域，通过光子学手段对射频信号进行群时延调控，最终获得多路不同延时的天线馈送射

频信号。实现光子真时延相控阵收发前端的关键在于光域群时延操控方法。1991 年，美国 W. NG 等首次利用固定

长度的光纤和光开关实现了光子真时延相控阵天线系统, 实现了 2 GHz 和 9 GHz 射频信号的波束扫描^[11]。美国海军研究实验室提出了利用波长相关的色散效应实现光子真时延的方案, 在 2 ~ 18 GHz 工作带宽内波束扫描角大于 100°^[12]。西班牙瓦伦西亚理工大学团队利用受激布里渊(SBS)散射的慢光效应实现光子真时延, 延迟时间为 0 ~ 10 ns^[13]。澳大利亚斯温伯恩技术大学和清华大学的研究人员基于小型化的微谐振腔产生光学频率梳作为多波长光源, 有效增加光子真时延相控阵系统可支持的天线单元数目^[14-15], 最高可达 81 个。美国俄亥俄州立大学的研究人员则基于集成的空间光学器件提供光子真时延, 可支持的天线单元数目高达 112 个, 射频覆盖范围超过 20 GHz^[16]。南京航空航天大学的研究团队提出利用微波光子滤波方法实现多波束光子真时延相控阵系统^[17]。

微波光子信道化接收机通过光子技术、器件在光域将宽带射频信号划分成若干均匀/非均匀子信道, 便于后续的进一步精细处理, 能够满足智能系统的宽带多频段信号感知接收需求。根据实现结构的不同, 微波光子信道化接收机大致可分为 3 类, 分别为空分复用型(SDM)、波分复用型(WDM)以及时分复用型(TDM)^[18]。SDM 型号微波光子信道化接收机利用空间滤波器将射频信号分离成多个并行信道, 每个信道包含一部分射频信号频谱的分离。美国 New Focus 公司的研究人员基于自由空间衍射光纤对射频信号实施信道化, 获得了 1 GHz 的信道分辨率, 总瞬时带宽超过了 100 GHz^[19]。WDM 微波光子信道化接收机利用光信道化滤波在光波长域对射频信号进行频谱切割, 使得每个光波长信道对应于一部分射频信号的频谱分量, 最终通过波分解复用获得多个平行且频谱分离的信道。西南

交通大学课题组基于多个不同中心频率的 SBS 增益谱进行光域信道化滤波, 信道分辨率可达十几兆赫兹^[20]。北京邮电大学研究人员结合两个相干光频率梳和相干解调技术解决了 WDM 方案需要频域精细滤波和精确波长对准的问题, 实验中获得了 7 个带宽为 0.5 GHz 的信道, 频谱覆盖 3.75 ~ 7.25 GHz^[21]。南京航空航天大学研究人员利用 2 个相干光频率梳以及 SBS 效应实现信道化接收机, 获得的信道间隔可以小于 80 MHz^[22]。TDM 型微波光子信道化接收机主要通过光波长扫描或者光频循环模块将射频信号的频谱映射至时域, 借助于时域控制开关在时间域进行射频信号频谱分离, 即一段时间对应于一部分频谱分量。清华大学研究人员结合循环光频移和时域光开关, 实现了 20 GHz 宽谱信号的信道化, 系统分辨率可达 2 MHz^[23]。

2 智能微波光子射频链路

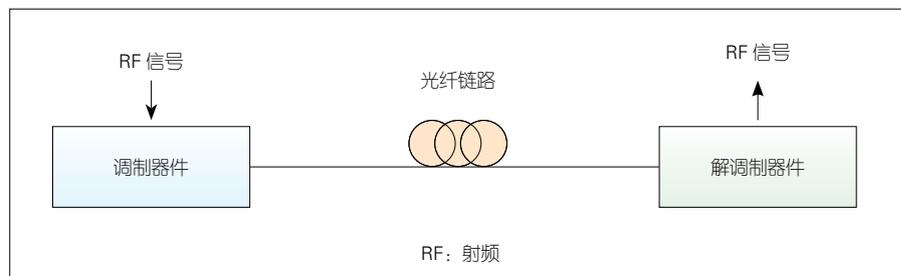
微波光子射频链路(MPRL)的基本模型如图 4 所示: 首先将模拟射频信号经电光调制器件加载至光载波上, 再利用光纤链路进行远端分发, 最后经光电解调器件恢复出射频信号。面向智能化系统的应用, MPRL 面临的核心挑战是如何保证多种不同频段、不同制式射频信号的高保真度输出, 涉及的链路特性有动态范围、相位稳定度以及不同频段、制式射频信号的兼容性。下面我们围绕上述 3 个问题, 分别介绍大动态范围

MPRL、高相位稳定性 MPRL, 以及多业务融合 MPRL。

2.1 大动态范围微波光子射频链路

MPRL 的动态范围表征链路可处理信号的幅度范围, 其下限取决于链路的噪声性能, 上限取决于链路的非线性特性; 因此, 抑制噪声和消除非线性是提升动态范围的关键。MPRL 的噪声抑制主要有两种方法: 一种是低偏置马赫-曾德尔调制器(MZM)^[24], 通过将低光生电流抑制光电探测器散粒噪声和激光器相对强度噪声(RIN); 另一种基于平衡探测技术^[25]抑制激光器的 RIN。相较于噪声的随机性, MPRL 的非线性失真来源明确(主要来源于调制器件与光电探测器件的非线性, 且在绝大多数情况下, 调制器件的调制非线性作用占主导地位), 产生机理又较为清楚, 通过链路的非线性失真补偿往往能够以较小的代价获得较大的动态范围的收益提升; 因此, MPRL 线性化一直以来都是大动态范围 MPRL 研究的热点与重点。已报道的 MPRL 线性化方法大致可分为前馈线性化、模拟预失真、数字线性化和全光线性化等。

前馈线性化与模拟预失真技术均借鉴于传统的电放大器线性化方法。前馈线性化方案需要两条光电链路: 一条链路进行错误信息提取, 另外一条将此错误信息传输至接收端与接收信号结合以实现非线性失真消



▲图 4 微波光子链路基本模型

除。美国霍普金斯大学的研究人员利用前馈线性化技术该技术对 MZM 强度调制 MPRL 进行非线性失真补偿,获得的链路无杂散动态范围(SFDR)为 $110 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3[26]}$ 。模拟预失真技术通过外部模拟电路在信号未调制光载波前进行预失真处理。模拟电路的传输函数与 MPRL 相反,两者级联最终可实现整个系统的线性化。加拿大康考迪亚大学研究团队基于零偏振二极管^[27]进行了直接调制 MPRL 的线性化,获得的链路 SFDR 大于 $110 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$ 。

数字线性化技术将模拟信号经模数转换变换到数字域,利用数字信号处理(DSP)算法进行链路的非线性失真补偿。线性化实现方法与模拟预失真类型类似:构造与 MPRL 的相反传递函数并对射频信号进行预先或后处理,以抵消 MPRL 的非线性失真。北京邮电大学的团队利用记忆多项式线性化模型,采用数字预失真的方式对宽带的射频信号进行非线性失真补偿,可实现超过 15 dB 的三阶交调失真(IMD3)抑制^[28]。美国加州大学洛杉矶分校的研究人员提出了一种数字后处理算法将 MPRL 的 SFDR 性能提高至 $120 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3[29]}$ 。美国霍普金斯大学的研究人员基于相位调制 I/Q 解调 MPRL,利用数字后处理的方法获得的链路 SFDR 超过 $126.8 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5[30]}$ 。

全光线线性化利用光子技术进行非线性失真补偿,具有大带宽的优势,是近年来的研究热点。全光线线性化的主流方法为利用较为复杂的级联或并联调制结构,结合参数优化设置获得两路非线性特性相反或相同的调制路径,最终通过两路非线性失真的相互抵消实现链路的线性化。美国麻省理工学院的课题组利用级联 MZM 结构,并通过非线性失真的抑制获得了 $132 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$ 的 SFDR 性能^[31]。美国加州大学洛杉矶分校的研究人员基于

双 MZM 并联结构进行 MPRL 的线性化,理论上可获得 $144 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$ 的 SFDR 性能^[32]。清华大学的研究人员进一步地提出了更为简单、稳定的基于双平行 MZM(DPMZM)的线性化方案,实验上获得了 $122.9 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 的 SFDR 性能^[33]。加拿大渥太华大学研究团队基于偏振调制器和 Sagnac 环方案,实现超过 50 dB 的 IMD3 抑制, SFDR 可达 $121 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3[34]}$ 。西南交通大学课题组利用铌酸锂相位调制器的偏振特性实现了 MPRL 的线性化^[35],结构简单且无偏置漂移。

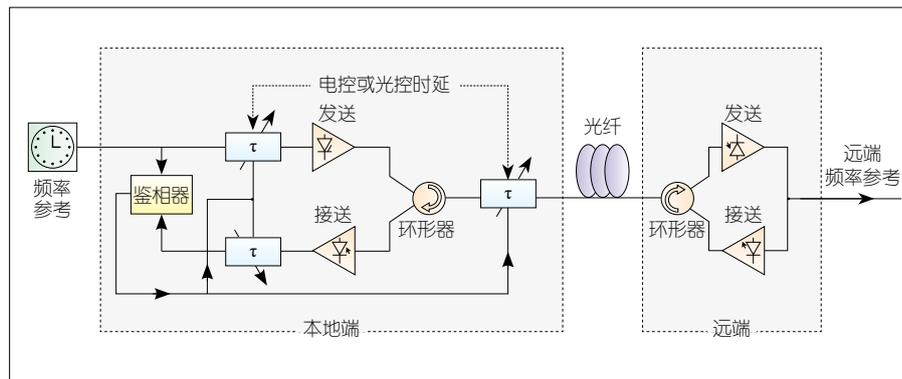
2.2 高相位稳定性微波光子射频链路

利用 MPRL 的低损耗、抗电磁干扰、大带宽等优势进行射频信号的长距离稳相传输,在射电天文学、深空网络、分布式合成孔径雷达、高精度时钟信号分配以及粒子加速器等系统中具有重要的应用价值。温度变化、机械振动等环境扰动所造成的光纤有效折射率与长度变化会引起 MPRL 传输射频信号的相位随机抖动,经时间积累,会严重影响系统的正常工作;因此,实现高相位稳定射频信号传输是 MPRL 非常重要的研究方向。

当前,MPRL 稳相传输方法主要分为两大类,一类为主动式稳相传输技术,其基本结构如图 5 所示^[36],其核心思路为提取链路往返信号的相位

抖动信息,以此反馈控制电路或者光路时延,从而补偿射频信号在 MPRL 传输中的相位抖动。德国联邦物理技术研究院的研究人员通过压控振荡器(VCO)反馈控制进行电路时延调节,实现了射频信号的 146 km 长距离稳相传输,1 s 和 30 000 s 频率稳定度分别为 3×10^{-15} 和 $1 \times 10^{-19[37]}$ 。法国巴黎天文台的研究人员利用了 VCO 电路延时反馈控制,实现了 176 km 的射频信号稳相传输,1 s 和 10 000 s 频率稳定度分别达到了 10^{-16} 和 10^{-19} 量级^[38]。北京大学的研究人员反馈控制电相移器实现了 100 MHz 信号的 100 km 稳相传输,1 s 和 4 000 s 频率稳定度分别为 3×10^{-14} 和 $3 \times 10^{-17[39]}$ 。法国巴黎大学的研究人员利用压电陶瓷光纤延迟线的反馈控制补偿光路时延抖动,实现了 1 s 和 1 d 频率稳定度分别为 1.3×10^{-15} 和 1×10^{-18} ,传输距离为 86 km,射频信号频率为 9.15 GHz^[40]。北京邮电大学的研究团队通过激光器波长的反馈控制进行光路时延抖动补偿,在 45 km 光纤链路和 2.5 GHz 传输射频信号情况下,获得的 1 s 和 104 s 频率稳定度分别为 3.3×10^{-13} 和 $7.5 \times 10^{-17[41]}$ 。

主动式补偿方法的性能直接取决于电相移器、VCO 和光可调延时线等补偿器件的自身特性,具有响应速度慢和调谐范围窄等限制。另一类稳相传输技术为被动式补偿方法,即利用



▲ 图 5 主动式微波光子射频链路稳相传输系统示意图

混频相消的原理进行链路的时延抖动补偿。我们以如图 6 所示的方案^[42]为例，简要阐述被动式补偿方法的一般原理：射频信号 $\cos(\omega_0 t)$ 在本地端二分频后经 MPRL 传输至远端，设链路传输带来的相位变化为 θ ，则在远端的射频信号变为 $\cos[0.5\omega_0(t-\theta)]$ 。该信号分成两路，一路回传至本地端与发送射频信号混频后得到的第二路的发送信号 $\cos[0.5\omega_0(t+\theta)]$ ，另外一路与该混频信号在远端混频，最终消除相位项 θ ，从而有效补偿光纤链路的相位抖动。

该方法不仅结构简单、补偿速度快，且理论上具有无限的补偿范围；因此是近些年来高稳相 MPRL 的研究热点。北京邮电大学的研究人员利用三级混频的结构，实现了相位抖动小于 0.25 rad 的 2.8 GHz 射频信号 10 km 稳相传输^[43]，并进一步优化了方案，在仅需本地端一级混频情况下，实现了 2.42 GHz 射频信号在 30 km 光纤链路中的稳相传输，获得的均方根相位漂移小于 0.026 rad^[44]。南京航空航天大学的研究团队在仅需一个微波源和两级混频情况下进行了 6 GHz 射频信号的 20 km 光纤稳相传输，信号的均方根时间抖动小于 1.33 ps^[45]。澳大利亚麦考瑞大学的研究人员则在 100 km MPRL 中验证了混频相消方法的可行性，1 万秒频率稳定度为 1×10^{-17} ^[46]。中国计量科学研究院-清华大学精密测量联合实验室、上海交通大学的研究人员进一步将混频相消方法拓展至多点稳相传输系统，获得的频率稳定度分别可达 $7 \times 10^{-17}/10^4 \text{ s}$ ^[47] 和 2 000 s ^[48]。

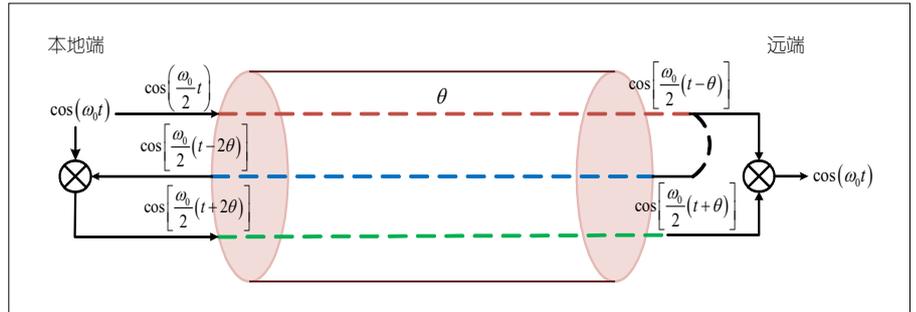
2.3 多业务融合的微波光子射频链路

对不同频段、调制格式和标准的信号“透明”是 MPRL 核心优势之一。相较于传统的数字基带传输方式一次只能传输单一业务，基于 MPRL 的

载无线 (RoF) 系统能够支持多种不同频段、制式的无线业务 (包括较低频段的传统无线业务以及毫米波太赫兹业务)，并以简化的方式在同一链路中融合传输，从而大幅提高网络的兼容性与可拓展性，支撑未来 5G/5.5G，甚至 6G 异构网络建设。

早在 2007 年，英国剑桥大学研究人员详细研究了支持 3G 和无线局域网 (WLAN) 两种制式的 RoF 系统。丹麦技术大学的研究人员^[49]在长达 78 km 的既有光纤传输链路中以波分

复用技术实现了 250 Mbit/s 的 5 GHz 射频、3.125 Gbit/s 的超宽带 (UWB)、WiMax 业务融合^[50]。美国佐治亚理工学院的研究人员提出了一种基于 MPRL 的多业务接入网络架构，实验验证了 Wi-Fi、WiMAX、60 GHz 毫米波 3 种不同业务的融合传输^[51]。中国台北科技大学的研究人员利用多个注入锁定的 FP 激光器以及波分复用技术，同时传输了 20 GHz 的微波信号、60 GHz 的毫米波信号以及 550 MHz 的有线电视信号^[52]。日本国立信息与通信研究所的



▲图 6 被动式微波光子射频链路稳相传输原理图

▲图 7 基于一体化光收发模块的微波光子射频链路系统及多业务演示

研究人员利用波分复用技术同时传输了 2.6 GHz 4G LTE-A 信号和 35.4 GHz 毫米波信号,并探讨了该方案在未来通信网络的应用前景^[53]。西班牙瓦伦西亚理工大学的研究人员利用基于多模光纤的 RoF 系统,同时传输了 2G/3G/4G 全球移动通信系统(GSM)信号^[54]。南京航空航天大学的研究人员利用双偏振双平行马赫-曾德尔调制器作为 RoF 系统的光发射机,实现了 11.1 Gbit/s 的高清视频信号和多个不同频段的 16 QAM 信号(3 GHz、5 GHz、60 GHz)的融合传输^[55]。英国伦敦大学学院的研究人员致力于更高频段信号的融合传输,实验验证了 5 个频段覆盖 220 ~ 280 GHz 的亚太赫兹信号在 10 km RoF 系统中的同时传输^[56]。

西南交通大学研究团队围绕多通道微波光子收发阵列封装设计展开研究,研制了集成宽带一体化光收发模块,并实施了低成本、小尺寸、低功耗高速宽带无线接入方案,搭建了具有 5 个节点的多业务融合的 MPRL 演示平台,如图 7 所示。研究人员进而在该平台上验证和演示了 2.97 Gbit/s 的高速无线接入、无压缩 1 080 P 制式高清视频传输、TD-LTE 视频通信,以及高速移动场景下(如 350 km/h 高铁) 500 Mbit/s 的无线接入速率。

3 结束语

基于微波光子技术的智能射频前端与链路具有大带宽、可重构、业务透明等优势,能够充分满足新一代信息技术的智能化发展需求。全球大量的课题组已经在此领域辛勤耕耘,并取得了一系列创新成果。与此同时,微波光子智能射频前端与链路还需要进一步解决成本、功耗、体积、噪声等方面的问题,为新一代信息技术的演进和变革提供核心支撑。

致谢

西南交通大学信息光子与通信研究中心潘炜教授、闫连山教授、罗斌教授,以及全体师生在论文撰写过程中给予了很多支持和贡献,在此深表感谢!

参考文献

- [1] YAO J P. Microwave Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314–335. DOI:10.1109/jlt.2008.2009551
- [2] CLARK T, WATERHOUSE R. Photonics for RF Front Ends[J]. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(3): 87–95. DOI:10.1109/mmm.2011.940319
- [3] AGARWAL A, DAILEY J M, TOLIVER P, et al. Photonically-Enabled RF Front-End for Wideband Flexible Down-Conversion[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7338. DOI:10.1364/oe.25.007338
- [4] ZHU D, CHEN W J, CHEN Z W, et al. RF Front-end Based on Microwave Photonics[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). Singapore: IEEE, 2017. DOI:10.1109/oecc.2017.8114850
- [5] SCOTTI F, ONORI D, BOGONI A, et al. Frequency-Agile and Filter-Free Wireless Communication Transceiver Based on Photonics[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m2g.2
- [6] YU H, CHEN M, GAO H, et al. RF Photonic Front-End Integrating with Local Oscillator Loop[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3918. DOI:10.1364/oe.22.003918
- [7] WANG J J, CHEN M H, LIANG Y H, et al. Broadband RF Front-End Using Microwave Photonics Filter[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 839. DOI:10.1364/oe.23.000839
- [8] 霍元东,于鸿晨,陈明华.基于硅基集成的可重构微波光子前端[J].中兴通讯技术, 2018, 24(4): 42–45. DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2018.03.008
- [9] ZOU X H, ZOU F, CAO Z Z, et al. Integrated Microwave Photonics: a Multifunctional Photonic Integrated Circuit for Diverse Microwave Signal Generation, Transmission, and Processing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(6): 1970027. DOI:10.1002/lpor.201970027
- [10] ZOU X H, ZOU F, CAO Z Z, et al. Integrated Microwave Photonics Meets Daily Life [EB/OL]. [2020-03-22]. https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_30/december_2019/extras/integrated_microwave_photonics_meets_daily_life/
- [11] NG W, WALSTON A A, TANGONAN G L, et al. The First Demonstration of an Optically Steered Microwave Phased Array Antenna Using True-Time-Delay[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(9): 1124–1131. DOI:10.1109/50.85809

- [12] FRANKEL M Y, ESMAN R D. True Time-Delay Fiber-Optic Control of an Ultrawideband Array Transmitter/receiver with Multibeam Capability[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2387–2394. DOI:10.1109/22.414593
- [13] CHIN S, THEVENAZ L, SANCHO J, et al. Broadband True Time Delay for Microwave Signal Processing, Using Slow Light Based on Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22599. DOI:10.1364/oe.18.022599
- [14] XU X Y, WU J Y, NGUYEN T G, et al. Photonic Microwave True Time Delays for Phased Array Antennas Using a 49 GHz FSR Integrated Optical Micro-Comb Source [Invited][J]. Photonics Research, 2018, 6(5): B30. DOI:10.1364/prj.6.000b30
- [15] XUE X X, XUAN Y, BAO C Y, et al. Micro-comb-Based True-Time-Delay Network for Microwave Beamforming with Arbitrary Beam Pattern Control[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2312–2321. DOI:10.1109/jlt.2018.2803743
- [16] ANDERSON B L, HO J G, COWAN W D, et al. Hardware Demonstration of Extremely Compact Optical True Time Delay Device for Wideband Electronically Steered Antennas[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1343–1353. DOI:10.1109/jlt.2011.2124444
- [17] YE X W, ZHANG F Z, AND PAN S L. Optical True Time Delay Unit for Multi-Beamforming [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10002–10008. DOI:10.1364/OE.23.010002
- [18] ZOU X H, LU B, PAN W, et al. Photonics for Microwave Measurements (Laser Photonics Reviews, 2016, 10(5): 700. DOI:10.1002/lpor.201670056
- [19] WANG W S, DAVIS R L, JUNG T J, et al. Characterization of a Coherent Optical RF Channelizer Based on a Diffraction Grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1996–2001. DOI:10.1109/22.954820
- [20] ZOU X H, LI W Z, PAN W, et al. Photonic-Assisted Microwave Channelizer with Improved Channel Characteristics Based on Spectrum-Controlled Stimulated Brillouin Scattering[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(9): 3470–3478. DOI:10.1109/tmtt.2013.2273892
- [21] XIE X J, DAI Y T, XU K, et al. Broadband Photonic RF Channelization Based on Coherent Optical Frequency Combs and I/Q Demodulators[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1196–1202. DOI:10.1109/jphot.2012.2207380
- [22] XU W Y, ZHU D, PAN S L. Coherent Photonic RF Channelization Based on Stimulated Brillouin Scattering[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Paphos, Cyprus: IEEE, 2015. DOI:10.1109/mwp.2015.7356719
- [23] LI R Y, CHEN H W, YU Y, et al. Multiple-Frequency Measurement Based on Serial Photonic Channelization Using Optical Wavelength Scanning[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4781. DOI:10.1364/ol.38.004781
- [24] FARWELL M L, CHANG W S C, HUBER D R. Increased Linear Dynamic Range by Low Biasing the Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7):

- 779–782. DOI:10.1109/68.229804
- [25] MADJAR A, MALZ O. A Balanced Fiber-optic Communication Link Featuring Laser RIN Cancellation[C]//1992 IEEE Microwave Symposium Digest MTT–S. Albuquerque, USA: IEEE, 1992:563–566. DOI:10.1109/mwsym.1992.188043
- [26] O'CONNOR S R, CLARK T R, NOVAK D. Wideband Adaptive Feedforward Photonic Link[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2810–2816. DOI:10.1109/jlt.2008.927189
- [27] ZHU R, ZHANG X P, HRAIMEL B, et al. Broadband Predistortion Circuit Using Zero Bias Diodes for Radio over Fiber Systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21): 2101–2104. DOI:10.1109/pt.2013.2281409
- [28] PEI Y Q, XU K, LI J Q, et al. Complexity-reduced Digital Predistortion for Subcarrier Multiplexed Radio over Fiber Systems Transmitting Sparse Multi-Band RF Signals[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3708. DOI:10.1364/oe.21.003708
- [29] LAM D, FARD A M, BUCKLEY B, et al. Digital Broadband Linearization of Optical Links[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 446. DOI:10.1364/ol.38.000446
- [30] CLARK T R, O'CONNOR S R, DENNIS M L. A Phase-Modulation I/Q–Demodulation Microwave-to-Digital Photonic Link[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3039–3058. DOI:10.1109/tmtt.2010.2076971
- [31] BETTS G E. Linearized Modulator for Sub-octave-bandpass Optical Analog Links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(12): 2642–2649. DOI:10.1109/22.339809
- [32] ZHU G H, LIU W, FETTERMAN H R. A Broadband Linearized Coherent Analog Fiber-Optic Link Employing Dual Parallel Mach-Zehnder Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1627–1629. DOI:10.1109/pt.2009.2031166
- [33] LI S Y, ZHENG X P, ZHANG H Y, et al. Highly Linear Radio-Over-Fiber System Incorporating a Single-Drive Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(24): 1775–1777. DOI:10.1109/pt.2010.2082516
- [34] LI W, WANG L X, ZHU N H. Highly Linear Microwave Photonic Link Using a Polarization Modulator in a Sagnac Loop[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 89–92. DOI:10.1109/pt.2013.2289938
- [35] CHEN Z Y, YAN L S, PAN W, et al. SFDR Enhancement in Analog Photonic Links by Simultaneous Compensation for Dispersion and Nonlinearity[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20999. DOI:10.1364/oe.21.020999
- [36] SLIWCZYNSKI L, KREHLIK P, BUCZEK L, et al. Active Propagation Delay Stabilization for Fiber-Optic Frequency Distribution Using Controlled Electronic Delay Lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1480–1488. DOI:10.1109/tim.2010.2090696
- [37] GROSCHE G, TERRA O, PREDEHL K, et al. Optical Frequency Transfer Via 146 Km Fiber Link with 10–19 Relative Accuracy[J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2270. DOI:10.1364/ol.34.002270
- [38] JIANG H, KÉFÉLIAN F, CRANE S, et al. Long-Distance Frequency Transfer over an Urban Fiber Link Using Optical Phase Stabilization[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2029. DOI:10.1364/josab.25.002029
- [39] ZHAO J Y, LI D W, NING B, et al. Highly-Stable Frequency Transfer Via Fiber Link with Improved Electrical Error Signal Extraction and Compensation Scheme[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8829. DOI:10.1364/oe.23.008829
- [40] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, LOURS M, et al. High-Resolution Microwave Frequency Dissemination on an 86-km Urban Optical Link[J]. Applied Physics B, 2010, 98(4): 723–727. DOI:10.1007/s00340-009-3832-1
- [41] ZHANG A X, DAI Y T, YIN F F, et al. Phase Stabilized Downlink Transmission for Wideband Radio Frequency Signal Via Optical Fiber Link[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21560. DOI:10.1364/oe.22.021560
- [42] 姜瑶, 邹喜华, 严相雷, 等. 基于被动补偿的点到多点微波信号光纤稳相传输[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 86–92
- [43] WU Z L, DAI Y T, YIN F F, et al. Stable Radio Frequency Phase Delivery by Rapid and Endless Post Error Cancellation[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1098. DOI:10.1364/ol.38.001098
- [44] YIN F F, ZHANG A X, DAI Y T, et al. Phase-Conjugation-Based Fast RF Phase Stabilization for Fiber Delivery[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 878. DOI:10.1364/oe.22.000878
- [45] WEI J, ZHANG F Z, ZHOU Y G, et al. Stable Fiber Delivery of Radio-Frequency Signal Based on Passive Phase Correction[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3360. DOI:10.1364/ol.39.003360
- [46] HE Y B, ORR B J, BALDWIN K G H, et al. Stable Radio-Frequency Transfer over Optical Fiber by Phase-Conjugate Frequency Mixing[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18754. DOI:10.1364/oe.21.018754
- [47] BAI Y, WANG B, GAO C, et al. Fiber-Based Radio Frequency Dissemination for Branching Networks with Passive Phase-Noise Cancellation[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 061201. DOI:10.3788/col201513.061201
- [48] LI H W, WU G L, ZHANG J P, et al. Multi-Access Fiber-Optic Radio Frequency Transfer with Passive Phase Noise Compensation[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5672. DOI:10.1364/ol.41.005672
- [49] CRISP M J, LI S, WONFOR A, et al. Demonstration of a Radio over Fibre Distributed Antenna Network for Combined In-Building WLAN and 3G Coverage[C]//OFC/NFOEC 2007 – 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2007. DOI:10.1109/ofc.2007.4348378
- [50] PRINCE K, JENSEN J B, CABALLERO A, et al. Converged Wireline and Wireless Access over a 78-km Deployed Fiber Long-Reach WDM PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(17): 1274–1276. DOI:10.1109/lpt.2009.2025699
- [51] LIU C, ZHANG L, ZHU M, et al. A Novel Multi-Service Small-Cell Cloud Radio Access Network for Mobile Backhaul and Computing Based on Radio-Over-Fiber Technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2869–2875. DOI:10.1109/jlt.2013.2274193
- [52] LI C Y, LU H H, CHU C A, et al. Hybrid Wireless-over-Fiber Transmission System Based on Multiple Injection-Locked FP LDs[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19874. DOI:10.1364/oe.23.019874
- [53] DAT P T, KANNO A, YAMAMOTO N, et al. Seamless Convergence of Fiber and Wireless Systems for 5G and beyond Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 592–605. DOI:10.1109/jlt.2018.2883337
- [54] MORANT M, LLORENTE R. Reconfigurable Radio-over-Multicore Optical Fronthaul for Seamless 2G, UMTS and LTE-A MIMO Wireless Provision[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C., USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w2a.43
- [55] TANG Z Z, ZHANG F Z, PAN S L. 60-GHz RoF System for Dispersion-Free Transmission of HD and Multi-Band 16QAM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1305–1308. DOI:10.1109/pt.2018.2845672
- [56] SHAMS H, FICE M J, GONZALEZ-GUERREIRO L, et al. Sub-THz Wireless over Fiber for Frequency Band 220–280 GHz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20): 4786–4793. DOI:10.1109/jlt.2016.2558450

作者简介



邹喜华, 西南交通大学教授; 主要研究领域为微波光子学、集成光子学等; 先后主持和参加基金项目20余项, 获得近10项科研奖励与荣誉, 已发表SCI/EI检索论文100余篇。



李沛轩, 西南交通大学副教授; 主要研究领域为微波光子学、光与无线融合; 先后参加基金项目10余项; 已发表论文10余篇, 其中被SCI/EI检索14篇。



刘丰玮, 西南交通大学硕士研究生; 主要研究领域为微波光子学与光与无线融合。