

超宽带阵列化微波光子处理技术

周涛*, 刘静娴, 陈智宇, 何梓昂, 谢爱平, 钟欣, 崔岩, 龙敏慧

中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036

摘要 超宽带阵列化已经成为雷达、通信、电子战等电子信息系统的共性发展趋势,而融合了微波和光子各自优势的微波光子处理技术,能够以一种全新的技术体制推动电子信息系统的不断发展。回顾了微波光子学的国内外研究情况,探讨了兼容多种功能和场景的微波光子处理系统架构,并对微波光子高纯度信号产生、大动态传输、分布式稳相、光学波束形成和信道化等关键技术进行了分析,讨论了各项技术在理论、实验和应用研究上的进展,展望了微波光子技术未来的发展趋势。

关键词 光电子学; 微波光子学; 宽带传输; 稳相; 波束形成; 信道化; 光电振荡器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1725001

Ultra-Wideband Arrayed Microwave Photonic Processing Technology

Zhou Tao*, Liu Jingxian, Chen Zhiyu, He Ziang, Xie Aiping, Zhong Xin, Cui Yan,
Long Minhui

Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, Sichuan, China

Abstract Ultra-wideband arrays have been a trend of development of radar, communication, and electronic information systems. Microwave photonics (MWP), combining the advantages of both microwave and photonic technologies, will pave the way for the development of electronic information systems with novel mechanism. In this paper, the domestic and foreign research progresses of MWP are reviewed. A signal processing architecture based on MWP technologies and adapted to multiple scenarios is discussed. The research progresses in theories, experiments, and applications of typical MWP technologies, such as high quality signal generation, large dynamic signal transmission, phase stabilization of distributed signals, optical beamforming, and optical channelization, are described. In the end, the development trends of microwave photonics are expected.

Key words optoelectronics; microwave photonics; wideband transmission; phase stabilization; beamforming; channelization; optoelectronic oscillator

1 引言

在信息化时代,雷达、通信、电子战等系统围绕着电磁信号的利用与反制,在不断的博弈中快速发展。特别是在军事领域,对电磁信号的利用与反制能力成为衡量交战双方实力的重要标准。一旦脱离了对电磁信号的掌控,很多武器平台将无法发挥应有的作战效能。实际上,在进行火力交战之前,电磁频谱域内的攻防战早已无声地打响。电子战系统为了有效截获未知威胁对象辐射的信号,需要向更大带宽、更高灵敏度、更大动态范围、更快响应速度等方向发展。而雷达、通信等系统为了降低被发现和干扰的概率,同样也需要

具备更大的时域、空域、频域调控范围,且都需要通过阵列化孔径来实现空域的定向增强和波束赋形,因此超宽带阵列化已经成为雷达、通信、电子战等电子系统的共性发展趋势。近年来,多功能、一体化的概念屡屡被提出,以期在复用硬件资源的情况下通过重构实现多种系统功能。

然而,雷达、通信和电子战系统各自承担不同的使命和目标,在工作频段、先验信息和波形要求上各不相同:

1) 从工作方式和瞬时带宽来看,通信信号可以同时收发,其工作带宽在几十 MHz 到数 GHz 不等;雷达需要分时收发,通过自主发射并对目标反射的信号进

收稿日期: 2022-06-27; 修回日期: 2022-08-05; 录用日期: 2022-08-08

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2018YFB2201702)、国家自然科学基金(61771438)

通信作者: *zhj_zht@163.com

行接收,其瞬时工作带宽典型值为百 MHz,进行目标成像时则需要使用线性调频信号,带宽可达数 GHz;而电子战在用于无源侦察时,目标方位和频率均为未知数,因此需要高达数十 GHz 的瞬时带宽,此外,电子战中的侦察和干扰同时工作时还需要解决射频隔离和对消的问题。

2) 从来波方位上讲,通信信号的来波方位是已知的,雷达一般通过窄带波束扫描的方式确定目标方位,而电子战无源侦察需要瞬时大空域覆盖,因此需同时使用多波束确定目标方位。

3) 从动态范围上讲,虽然三者都需要较大的动态范围以适应不同距离和有强弱差异的信号,但雷达是双程传播,需要更大的动态范围以确保在强杂波和干扰下检测到微弱目标。另外,三者波形设计上也存在显著不同,通信信号一般使用准连续波以保证信号稳定传输,而雷达、电子战普遍使用脉冲信号进行距离和多普勒测量。

综上所述,雷达、通信和电子战等功能需求之间存在着一定的差异,这为常规技术体制下的多功能一体化进程带来了巨大的技术挑战。

微波光子技术可融合微波和光子的优势,通过将微波信号转换为光信号能够获得光子学处理的宽带、并行、高速、低耗、小巧等优势,与雷达、通信、电子战等系统的多功能一体化发展需求具有高度的契合性,有望成为突破电子系统瓶颈的一条新路径。对此,本文首先介绍了微波光子技术的基本概念,然后提出了一种能够支撑多种功能的微波光子系统架构,进而分别介绍若干种在系统中发挥不同功能和技术优势的微波光子关键技术的基本原理和发展情况,最后对微波光子技术的发展趋势进行了分析和展望。

2 微波光子学的概念及特点

微波光子学(MWP)是一门交叉学科,其命名直接来自最为相关的两个学科:微波学和光学。在微波光子学诞生之前,光通信技术的快速发展已经促使人们在微波与光波的相互作用问题上进行了大量的研究。1995年 Jager 等^[1]结合其对行波光电器件的研究,首次提出了微波光子学的概念。根据 Jager 的定义,微波光子学的早期概念是:研究工作于微波或者毫米波频率的高速光子器件,以及这些器件在微波或者光学系统中的应用。其后,微波光子学在世界范围内引起了高度关注,越来越多的课题组参与到微波光子技术及其应用的研究中来,微波光子学的概念也不断发展。2006年 Seeds 等^[2]提出微波光子学的新定义:1) 针对能够处理微波信号的光电器件和系统进行研究;2) 在微波系统中进行信号处理时采用的光电子器件和光电子系统。2009年 Yao^[3]阐述了对微波光子学概念以及应用的理解:微波光子学是一个研究微波和光学信号相互作用的交叉学科,通过光学方法实现微波和毫米波信号的产生、分配、控制和处理,并指出微波光子学可以应用于传感、雷达、通信、仪器设备和电子战系统。

2015年 Urick 等^[4]将微波光子学定义为一门多学科领域,包括了光学、微波和电子工程。微波光子学覆盖的频率范围为 1 kHz 至百 THz。

尽管在描述的侧重点上各有不同,但是相比最早期的定义,近年来人们更多地将微波光子学看作一门具有交叉特性的独立学科,其内涵既包括基础器件,也包括应用系统,目的是采用光子学处理的方法来解决常规微波手段难以解决的问题,或者是提升微波系统的性能。微波光子学发展到今天,至少在以下方面充分验证了其技术优势:

1) 光波的频率相对于微波提升了 4~5 个数量级,达到百 THz。微波域内的宽带信号转换到光域后,相对带宽大幅降低,从而可以当成窄带问题来解决,信号处理难度显著降低。

2) 光具有独立传播特性,波分复用、偏振复用等技术能够有效地将携带不同微波信号的光波进行合并或者分离,在阵列化传输和处理时并行性高,一致性好。

3) 光在光纤中的传输损耗相比微波在电缆中的传输损耗低了若干个数量级,不仅对于电子系统的关键性能十分有利,而且还有质量轻、成本低、电磁兼容性好等优点。

4) 基于光学技术的时频基准或微波源不需要多级变频就可以生成毫米波甚至太赫兹信号,其精确度、抖动、噪声等性能与传统电学方法相当甚至相比其更优^[5]。

上述优势几乎都是雷达、通信、电子战等电子信息系统的迫切需求的,因此微波光子技术在近年来成为了国际上的研究热点。

3 微波光子学的国内外研究进展

从 1996 年开始,国际上每年举办微波光子学国际会议,吸引全世界众多学者参加,而且从会议不断丰富的主题就可以看到,微波光子学还处于蓬勃发展的上升期,不断有分支方向产生。

在空天探测方面,2003年,美国、加拿大、欧洲国家、日本等多国在阿塔卡玛沙漠联合建设了大型毫米波阵列,微波光子学在系统中起到了信号超稳传输功能,实现了多个大型天线的信号合成。近年来,为了进一步提高对太空目标的角度分辨率,通过使用多种稳相技术,基线长度不断增加,已经从 2010 年的 600 m 逐渐扩展到 2020 年的 16 km^[6]。

在电子战方面,2008年英国 BAE 公司的电子战光控制子系统(EWOC)项目报道了面向机载电子支援措施(ESM)应用的宽带光学多波束样机,如图 1 所示^[7]。该系统不仅在 6~18 GHz 频段实现了大于 4 GHz 的瞬时带宽,而且其结构外形完全按照“阵风”战斗机的要求进行设计,其样机已经具备安装在战机上的能力。2010年澳大利亚国防部资助开展了基于微波光子技术的机载分布式系统,通过微波光子技术将飞机不同位置的天线所接收的信息进行传输、交换

以及集中的通用处理,并成功应用于 P-3C 猎户座海上巡逻机的 ALR-2001 型 ESM 设备中。2018 年,加拿大学者采用两路非相干激光器对接收到的射频(RF)信号进行下变频,同时使用数字化前馈方法补偿两路激光器的相位差,实现了低噪声的微波光子 ESM 接收机,工作带宽覆盖 0~50 GHz^[8]。中国电子科技集团公司第二十九研究所自 2001 年起,先后突破了声光接收机^[9]和高速光电采样技术,创新了能够响应超宽带线性调频信号的真延时光学同时多波束

形成等技术^[10],研制了首套超宽带阵列化的微波光子电子战系统。近年来,面向电子战的测频测向等关键技术发展迅速,2021 年,北京大学王兴军团队^[11]提出了集成的微波光子瞬时测频系统,工作频段达到 2~34 GHz,测试误差低至 10.85 MHz。2022 年,中国科学院祝宁华团队^[12]利用双驱动马赫-曾德尔调制器(MZM)电学端口的馈电设计构建了两条映射曲线,可以对±70.81°范围的来波方位进行无模糊检测,测角误差低于 2°。

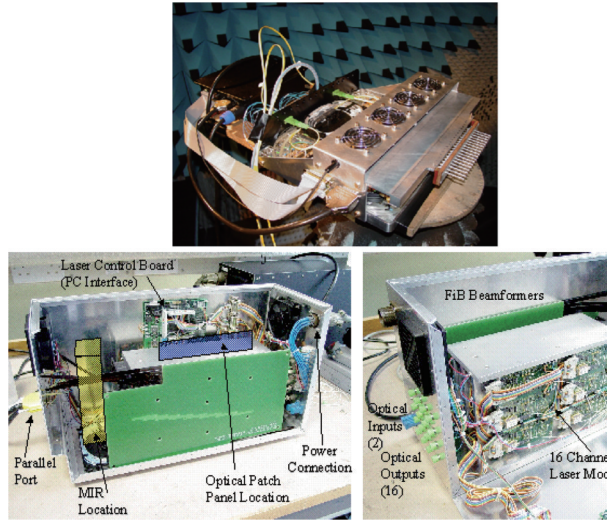


图 1 BAE 公司 EWOCs 项目的光学多波束样机^[7]
Fig. 1 Optical multibeam prototype of EWOCs project of BAE company^[7]

在通信方面:2012 年欧洲航天局在 Eurostar 3000 卫星平台采用微波光子技术实现了微波信号的上/下变频和光子互联;2018 年空客防务与空间公司启动了通信卫星的光子有效载荷(OPTIMA)项目^[13],现阶段已经完成了光发射模块、光开关模块的样件研发[图 2

(a)和 2(b)]和初步测试[图 2(c)],有望在 2023 年完成在轨系统测试;2020 年空客防务与空间公司宣称将为阿拉伯卫星通信组织研制新一代的电信卫星 BADR-8,并将嵌入新型光通信载荷,以提高通信容量^[14]。

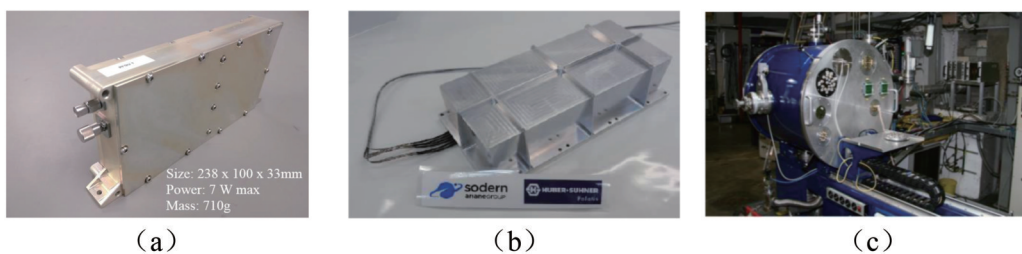
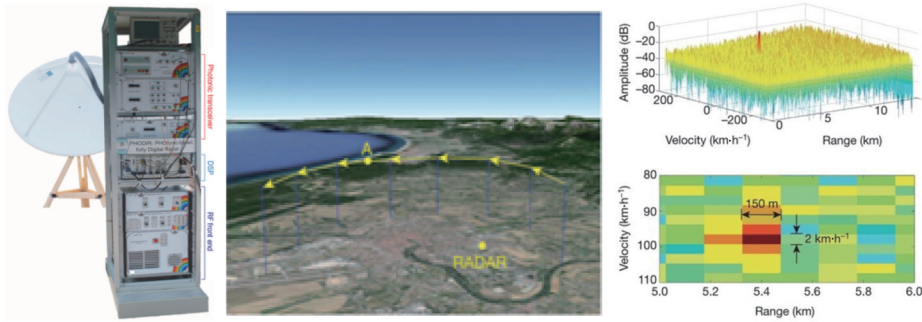
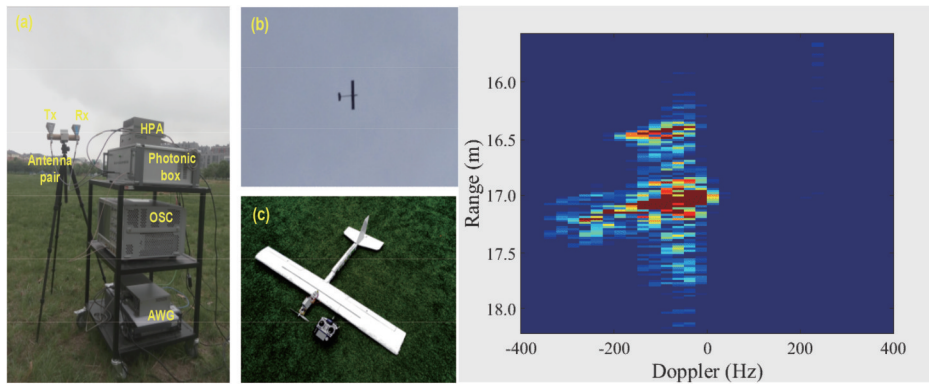


图 2 OPTIMA 项目研制的光学样件和辐射测试场景^[13]。(a)光发射(TX)模块;(b)光开关模块;(c)测试场景
Fig. 2 Photonic prototype and radiation test scenario of OPTIMA project^[13]. (a) TX module; (b) optical switch module; (c) test scenario

在雷达方面:2014 年,意大利研究人员在欧洲的全光数字雷达(PHODIR)项目支持下,成功研制了全光相参雷达系统(图 3)^[15],为雷达走向更宽频段和更高处理精度打开了一扇新的大门;2017 年,南京航空航天大学、中国科学院电子学研究所等单位相继报道了微波光子成像雷达的工作并开展了外场实验验证^[16-18],如图 4 所示;2021 年,北京邮电大学提出了一种用于 HF 到 Ka 频段的超宽带、可重构微波光子雷达系统。该系统利用光学的带宽优势:在发射部分通过

级联调制器和滤波设计,理论上可以发射任意频率和带宽的信号;在接收部分设计了两套去啁啾方案,分别用于高频段和低频段的信号接收^[19]。

在一体化方面:2013 年欧洲防务局(EDA)牵头的多功能光学可重构扩展设备(MORSE)项目旨在开发一种同时具备波束形成和阵元动态可重构能力的前端架构,以用于地面、无人机、飞机、舰艇上的战场预警和态势感知系统中;2018 年,美国特拉华大学的研究人员验证了一套光学多波束及下变频系统,通过引入一

图 3 PHODIR 原理样机和测试结果^[15]Fig. 3 Prototype and experimental results of PHODIR^[15]图 4 国内微波光子雷达的原理样机与成像效果^[17]Fig. 4 Prototype and imaging results of microwave photonic radar in China^[17]

路相干光作为本振信号,并在透镜焦平面放置探测阵列,可以将光学多波束直接下变频到中频进行数字处理,该系统能够同时处理来自不同方向的雷达和通信信号^[20];2021年,华东师范大学陈阳团队^[21]通过同时发射一个 8 GHz 的点频信号和一个 8.5~12.5 GHz 的线性调频信号,解决了微波光子雷达中使用单啁啾线性调频信号无法测速而双啁啾线性调频信号难以成像的问题,验证了具备测距、测速和高精度成像的多功能微波光子雷达系统,距离测试误差为 5.9 cm,速度误差为 2.8 cm/s;同年,为了适应多功能系统,南京航空航天大学潘时龙团队^[22]研究了多功能可重构的线性调频信号产生方法,能够产生 8~32 GHz、5 μ s 时长的啁啾线性调频信号,8~16 GHz 和 15~23 GHz、时长为 1.6 μ s 的双波长信号,以及 8~20 GHz 和 20~32 GHz 时长为 2.5 μ s 的双波长信号。

4 面向多功能应用的超宽带阵列化微波光子系统架构

雷达、通信、电子战等不同电子系统的功能作用、波形特征和处理算法各不相同,但都在构型上趋向于分布式、在孔径上趋向于阵列化、在空域上进行波束定向增强,且在频域、时域和信号域上支撑不同的系统处理功能。所以,本课题组提出了一种兼顾多种不同系统需求的通用微波光子系统架构,如图 5 所示。

该架构在用于信号接收时,分布式阵列孔径接收

到宽带微波信号,信号经宽带阵列化前端进行陷波及滤波放大等处理后,由电光转换加载到光上进行远距离光纤传输。在中心站通过信号分配将所接收信号的部分或者全部作为待处理信号,阵列信号在宽带多波束形成系统中实现波束合成,进入信号接收与处理环节执行信道化、下变频、模数转换等后续操作。在用于信号发射时,系统产生高纯度的微波信号并将其加载到光上,配合宽带波束形成、信号分配、阵列化发射前端等环节实现微波信号辐射。

宽带阵列化前端实现了全频段信号的高保真电光转换,最大程度地保留了原始信息,同时通过分布式稳相和可重构开关切换保障了离散孔径之间的相参性和灵活性,所以具备了适应雷达、通信、电子战等多样化应用场景的能力。

在此统一的多功能硬件架构下,可以为雷达、通信、电子战提供尽可能通用的共性处理能力。其中,前置的超宽带阵列可以实现超大带宽信号的传输,能够最大化兼容不同处理要求对带宽和通道的动态需求:

1)通过可重构信号分配网络将天线孔径信号与不同的处理功能分离,实现按需分配;2)通过高精度稳相支持分布式相参处理,使得阵列构型与不同的处理功能分离,实现平台去耦。在此基础上,雷达可以通过处理中心产生本振信号,然后通过分布式稳相实现远程本振分发和合成孔径探测。通信上,通过分布式相参实现多输入多输出(MIMO)通信,通过宽带阵列化前端和

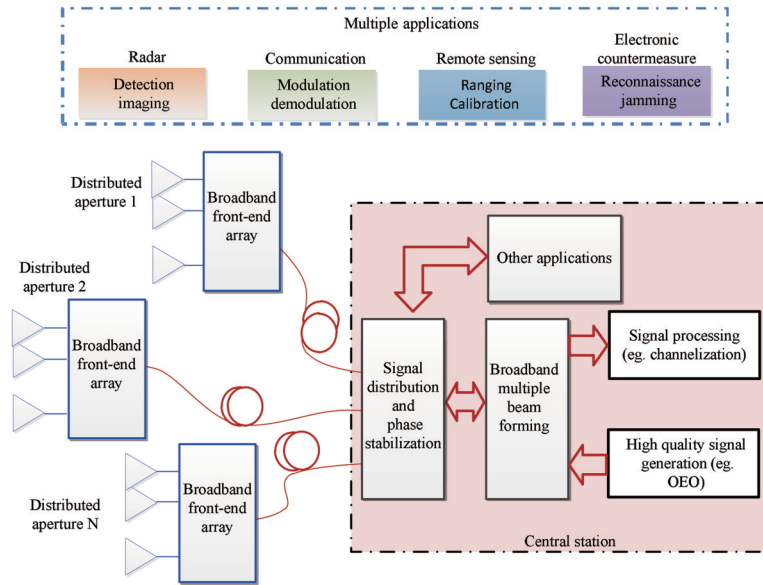


图 5 典型微波光子系统应用架构

Fig. 5 Typical architecture of microwave photonic system

多波束实现多用户切换。电子战既可以通过宽带阵列化前端完成同时多波束侦察干扰,也可以通过分布式稳相完成无源定位、定点干扰等功能。因此,对于图 5 所示的多功能架构,可以利用微波光子超宽带和柔性布站的优势,在统一的硬件架构下实现雷达、通信、电子战等多种功能。

可以看到,该微波光子系统中涉及的共性关键技术包括高性能微波光子传输链路、支撑长距离光纤传输的相位稳定性控制、宽带光学波束形成、信道化处理、高纯度微波信号产生方法等,下面将对上述关键技术的发展情况进行详细介绍。

5 超宽带阵列化微波光子处理关键技术

5.1 微波光子信号传输技术

微波光子信号传输是将微波信号调制到光上,经由光纤或其他媒质将信号传输到远端进行后续处理的技术。光纤的传输损耗典型值只有 0.2 dB/km,且体积小、重量轻,目前光纤是代替传统电缆进行长距离传输的最佳方式。微波光子传输的硬件架构主要由光电互转换器件和传输媒质组成,其中,光电互转换环节引入了相对强度噪声、散粒噪声和热噪声,如果加入光纤放大器,还会引入自发辐射噪声,这些噪声将显著恶化系统的增益、噪声系数和无杂散动态范围(SFDR)等关键指标。

针对微波光子链路(MPL)的性能提升,一种方法是采用非线性效应抑制交叉调制。大连理工大学赵明山团队^[23-24]于 2016 年和 2017 年先后提出了基于受激布里渊散射效应以及 Sagnac 干涉仪与光纤布拉格光栅的微波光子链路,利用非线性效应抑制三阶交叉调制失真信号,进而改善链路的 SFDR。另一种提升微波光子链路性能的方法是采用特殊调制设计的微波光

子链路,包括基于相位调制器、偏振调制器及双平行调制器的大动态光链路。2016 年,大连理工大学 Han 等^[25]提出了基于偏振调制器的高线性微波光子链路,如图 6(a)所示,利用光带通滤波器对调制信号光载波及其边带的功率进行优化控制,进而实现对偶次谐波及三阶交叉调制失真的抑制,与传统链路相比,SFDR 提升了 13 dB。2017 年,里约热内卢通信研究中心提出一种基于双平行电光调制器及光前馈补偿的线性化方法,如图 6(b)所示,通过调节电光调制器的偏置电流及各个臂的射频功率,实现二阶交叉调制失真和三阶交叉调制失真的同时补偿^[26]。2018 年,西安电子科技大学文爱军团队^[27]提出了一种基于双波长与相位调制器的大动态微波光子链路,如图 6(c)所示,使用波分复用器实现相位调制到强度调制的转换,通过调节两光源的功率值之比,两支路产生的三阶交调失真相互抵消,SFDR 能够提升 14.54 dB。2019 年,北京邮电大学喻松团队^[28]针对相位调制链路非线性失真与光调制边带的关系开展理论研究,并通过光谱矢量处理实现非线性失真的抑制,如图 6(d)所示,SFDR 由 100.9 dB·Hz^{2/3} 提升至 122 dB·Hz^{2/3}。

在用于阵列化信号传输时,传统方法是将不同阵元天线接收到的射频信号调制到不同波长的光载波上,通过波长复用技术减小系统规模。随着阵列规模的扩大、工作频段不断提升,波长资源不足的问题逐渐凸显。针对上述问题,本课题组提出了一种兼具超宽带、大动态和高一致性的微波光子射频前端方案,如图 7 所示^[29],在电光调制环节采用载波抑制调制,在信号合成时采用微波光子相干接收技术,一方面能够解决相干合成时的载波互扰问题,另一方面避免了探测器因强光载波而饱和的问题。通过提升调制效率及抑制共模噪声,能够有效地改善前端的噪声系数、SFDR 等性能,该方法在 6~18 GHz 工作频带内实现了 SFDR

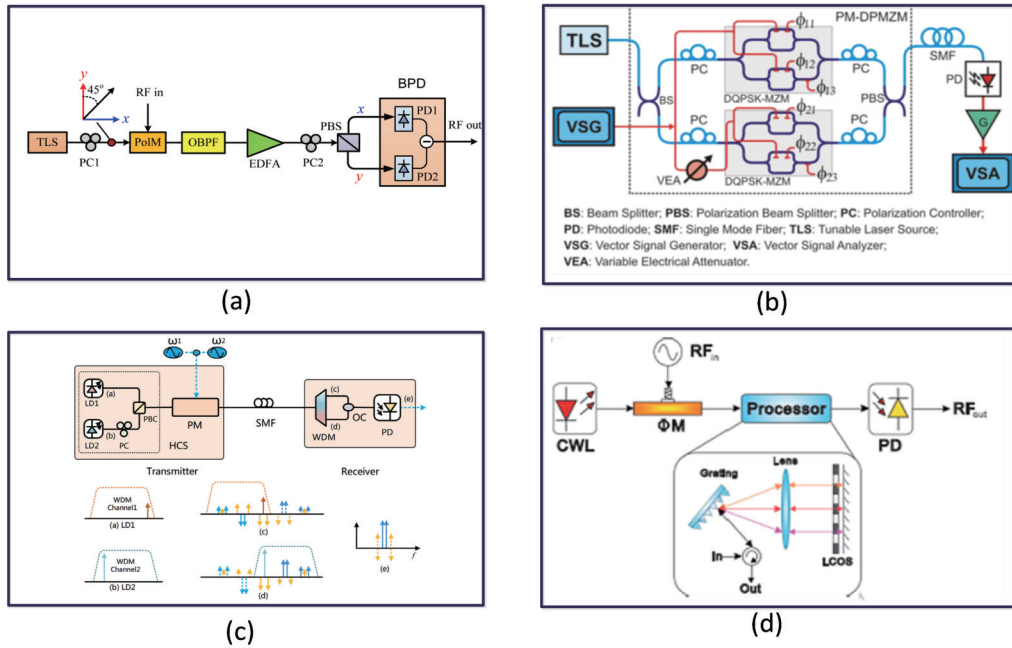


图 6 基于特殊调制器的大动态微波光子链路^[25-28]。(a)基于正交偏振调制的 MPL;(b)使用双平行调制和前馈补偿的 MPL;(c)基于双波长的线性化 MPL;(d)基于光谱矢量调控的 MPL
 Fig. 6 Large dynamic microwave photonic links based on special modulators^[25-28]. (a) MPL based on orthogonal polarization modulation; (b) MPL using double parallel modulation and feed-forward optical compensation; (c) dual-wavelength linearized MPL; (d) MPL based on optical spectrum vector manipulation

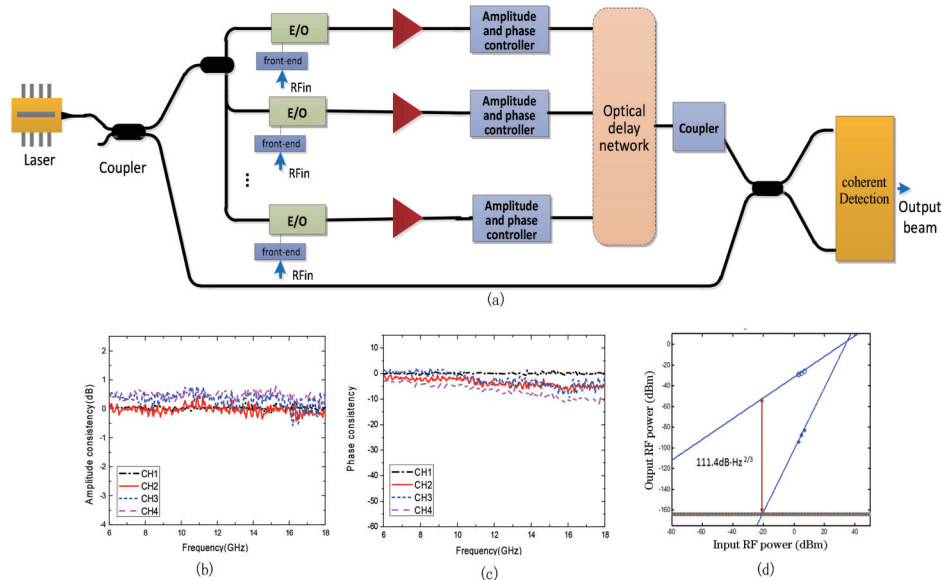


图 7 相干微波光子前端构成及其测试结果^[29]。(a)相干微波光子前端构成;(b)幅度一致性;(c)相位一致性;(d) 18 GHz 处的实测 SFDR
 Fig. 7 Block diagram and measured results of coherent microwave photonic front-end^[29]. (a) Block diagram of coherent microwave photonic front-end; (b) amplitude consistency; (c) phase consistency; (d) measured SFDR at 18 GHz

优于 $110 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 、多通道幅度一致性优于 $\pm 1 \text{ dB}$ 、多通道相位一致性优于 $\pm 10^\circ$ 的性能,实现了宽带射频信号的高质量传输。

5.2 分布式光稳相技术

在分布式频率传输系统中,光纤折射率因受温度、振动等环境因素的影响而发生变化,引起环路延时抖动,使得传输信号的相位产生扰动。对于典型的 1 km

光纤, 1°C 的温度变化即可产生 40 ps 的延时抖动, 10 GHz 信号的相位抖动高达 144° 。这不仅导致相位噪声的增加,还会破坏通道之间的相对相位差,使得系统难以满足分布式节点之间的高精度时频同步要求。为了解决以上问题,分布式光稳相传输技术得到了广泛研究。

分布式光稳相技术可分为主动往返相位校正技术

和被动往返相位校正技术两大类。前者通过一个导频信号往返传输测出相位抖动,并通过主动反馈机制实现相位补偿,补偿器件可以是可调延迟线、可调激光器、锁相环等。该方法的相位稳定性好,但是往返环路的时间限制了相位补偿周期。后者基于相位共轭法,在发射端对射频信号分频、射频信号经往返传输后又与发射信号混频的方式补偿传输链路的相位抖动,从而实现接收信号的稳定相位传输^[30]。这种方

法的成本较低,响应速度快,适用于对点频信号的高稳定传输。

2012年,德国科学家利用高稳定光梳分发的方法实现了德国加兴到布伦瑞克共 920 km 的时钟传输^[31],如图 8(a)所示,长期频率抖动可低至 4×10^{-19} 。2021年,澳大利亚研究人员实现了自由空间的时钟稳相传输,如图 8(b)所示,该工作实现了 1.6×10^{-19} @40 s 的频率抖动^[32]。

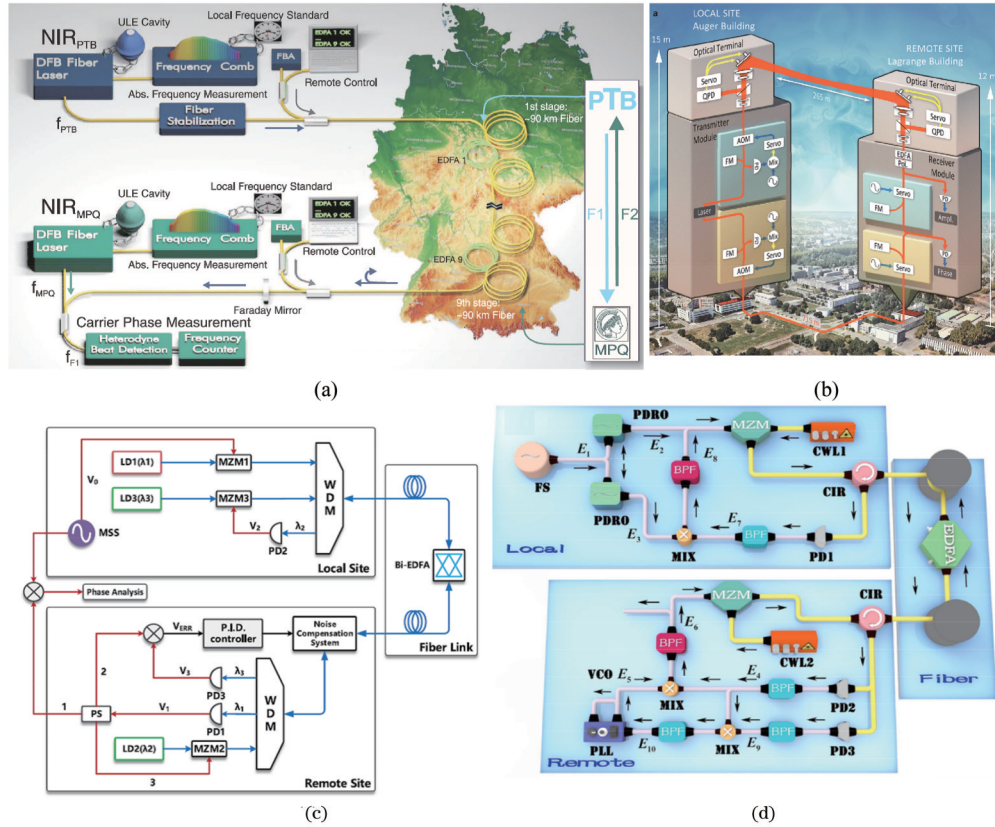


图 8 几种分布式光稳相系统^[31-34]。(a) 920 km 光纤链路实验场景;(b)楼间点到点稳相光频率传递;(c)基于 3 波长光学补偿的 RF 信号分配;(d)基于双向频分复用的 RF 信号传递

Fig. 8 Several distributed optical systems with phase stabilization^[31-34]. (a) Experimental setup for characterization of 920-km fiber link; (b) point-to-point phase-stabilized optical frequency transfer between buildings; (c) RF signal dissemination based on 3-wavelength optical compensation; (d) RF signal transfer using bidirectional frequency division multiplexing

往返相位校正中的一个技术难点是:当同一波长信号在光纤中双向传输时,后向菲涅耳反射、瑞利散射和布里渊散射将会严重影响通信信号质量。为了解决这一问题,双向波分复用和频分复用技术得到了发展。其核心思想是在本地端和远端利用不同波长或不同频率来传输信号,那么在光纤中产生的后向散射效应就无法影响相向传输的信号。2019年,中国科学院上海光学精密机械研究所蔡海文团队提出了基于波分复用系统的稳相传输架构,如图 8(c)所示,该方案利用三个波长,使信号在光纤中往返传输三次,利用两次传输到远端节点的信号进行鉴相以控制相位补偿模块,实现了 55 km 稳相传输,频率抖动为 8.1×10^{-18} @10000 s^[34]。为了节约波长资源的消耗,2021年上海交通大学陈建平团队^[33]提出了基于双向频分复用的稳

相传输技术,如图 8(d)所示,首先在本地产生一个频率为 f_1 的信号,其到远端后与压控振荡器(VCO)产生的信号混频至频率 f_2 并回传,传回本地端后再次变频为 f_3 后传输到远端。利用第一次传输和第三次传输的鉴相结果来控制远端 VCO,在传输 120 km 后实现了 4.6×10^{-19} @20000 s 的频率抖动。

当待接收的微波是非配合的未知信号时,传统基于先验信息的往返传输补偿技术难以适用。为了解决这一问题,本课题组提出了基于导频往返传输的多通道宽带稳相链路架构^[35],如图 9(a)所示。在中心处理单元,一个参考射频信号(称为导频)被调制到波长为 λ_1 的光载波上,并经环形器、可调光延迟线以及单模光纤传输到对应远端。在远端,天线阵列被放置在两个不同的地点,每个地点包含两个天线。4 个微

波信号被调制在波长为 $\lambda_2 \sim \lambda_5$ 的光载波上,输入信号与导频信号在远端通过波分复用器(WDM)合路并返回中心处理单元。这样,远端接收的信号仅进行了一次传输,而导频信号进行的是往返传输。最后,导频信号通过解复用器(DEMUX)滤出后经过光开关送入相位补偿单元,实现相位的稳定传输。由于光开关和可调光纤延迟线(VODL)的调节速度远高于温度引起的相位抖动变化,因此在分布式系统的中心处理单元只需使用一个相位补偿单元即可。设定环境

温度在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 之间线性变化,变化时间为 2 h ,在 2 GHz 和 18 GHz 频率下的相位抖动值在补偿前分别高达 100° 和 360° ,补偿后对应的抖动值被抑制到 3.6° 和 8.4° ,如图 9(b)和(c)所示。如图 9(d)所示,该方案在传输 0.5 km 后频率抖动仅为 $10^{-12}@1\text{ s}$ 。上述方案重点瞄准分布式系统中宽带非合作信号的稳相传输需求,并考虑到工程应用因素,利用一套稳相设备即可完成 4 个不同节点的稳相传输,能够有效地降低系统造价。

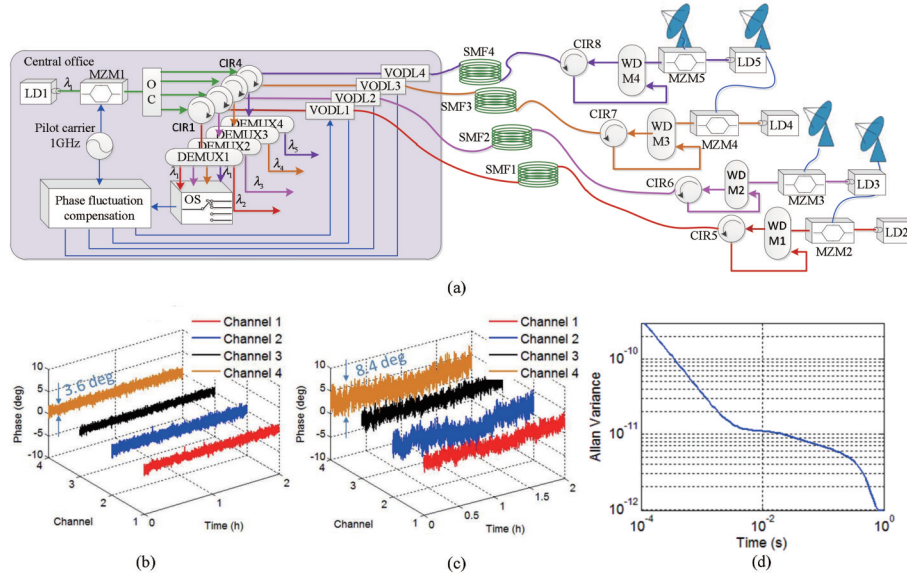


图 9 基于导频往返传输的多通道宽带稳相链路^[35]。(a)架构图; 20° 温变下 2 h 内(b) 2 GHz 和(c) 18 GHz 信号经 4 通道后的相位抖动; (d) 0.5 km 光纤长度下的阿伦方差

Fig. 9 Multichannel broadband phase stable link based on pilot round trip transmission^[35]. (a) Schematic diagram; phase jitters of four downlinks for (b) 2 GHz and (c) 18 GHz signals after compensation with temperature change of 20° in 2 h ; (d) Allan variance over 0.5 km fiber link

5.3 光学波束形成技术

光学波束形成技术是阵列信号处理范畴的一个重要分支,其核心思想是对天线阵各阵元接收(或发射)的微波信号分别进行幅相加权,最终使特定方向上的信号获得最大效率的合成,得到特定指向的天线阵方向图。传统采用移相器的电子波束形成网络存在瞬时带宽窄和在不同频率下的指向偏头等问题,导致宽带脉冲信号的波形和频谱产生显著畸变。而基于延迟线的真实延时系统能够适应大带宽,不论信号的频率包含多少分量,都不会产生波形失真,从根本上排除了信号带宽的限制^[10]。

基于传播媒介的不同,光学波束形成可以分为基于光纤光学、基于自由空间和基于集成波导等形式。基于自由空间的波束形成系统对平台稳定性要求高,且不易集成。光纤光学方法及其应用得到广泛的研究,成熟度最高,该方法通常采用的延时器件包括单模光纤、色散光纤或光纤光栅,但是系统基于分立器件实现,在体积、重量、可靠性等方面仍有不足。近年来,国内外逐渐开展了基于集成波导的光学波束形成技术,包括硅基微环光延迟、波导光栅光延迟以及开关切换

光延迟等方案^[36]。荷兰屯特大学采用硅基氮化硅波导微环的慢光可调谐延时特性,克服了微环在高密度集成以及损耗方面的瓶颈问题,2010年 Zhuang 等^[37]展示了一个 1×8 的二叉树结构光学波束形成网络芯片。如图 10(a)所示,该芯片采用级联微环结构作为延时调谐单元,芯片的射频工作带宽为 2.5 GHz ,尚不能满足超宽带的使用需求。2019年,东南大学崔一平团队^[38]提出了基于阵列波导光栅(AWG)环路的固定延时芯片,由于 AWG 的频谱随衍射级次的改变具有周期性,因此可以被多组波长复用。如图 10(b)所示,通过 23×23 的密集 WDM 和 1×8 的稀疏 WDM 两级串联,实现了 8 元阵下的同时 8 波束,最大延时量达 277.83 ps ,延时精度可达 $\pm 0.14\text{ ps}$,支持 $8 \sim 12\text{ GHz}$ 频段实现 $\pm 52.5^\circ$ 波束覆盖,这种方法具有良好的宽带适应性。2020年,上海交通大学陈建平团队^[39]基于 SOI(silicon on insulator)基底实现了 8 阵元的波束形成芯片,如图 10(c)所示,该芯片上包含 8 通道开关延时、1 个调制器和 8 个光电探测器,可支持 $8 \sim 18\text{ GHz}$ 频段实现 $-75.51^\circ \sim 75.64^\circ$ 范围的波束扫描。

与雷达和通信系统使用单波束或少量同时波束不

同,电子战系统需要大量的同时多波束。对此,2018年希腊学者分析了基于Blass矩阵的光学多波束结构,如图10(d)所示^[40]。该光学结构的预计尺寸约为90 cm²,比

射频多波束结构 $2.3 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 的尺寸减小了3个数量级,展示了基于光子集成技术的光学多波束芯片的技术优势,但该方法存在大量的交叉波导,且延迟难以调控。

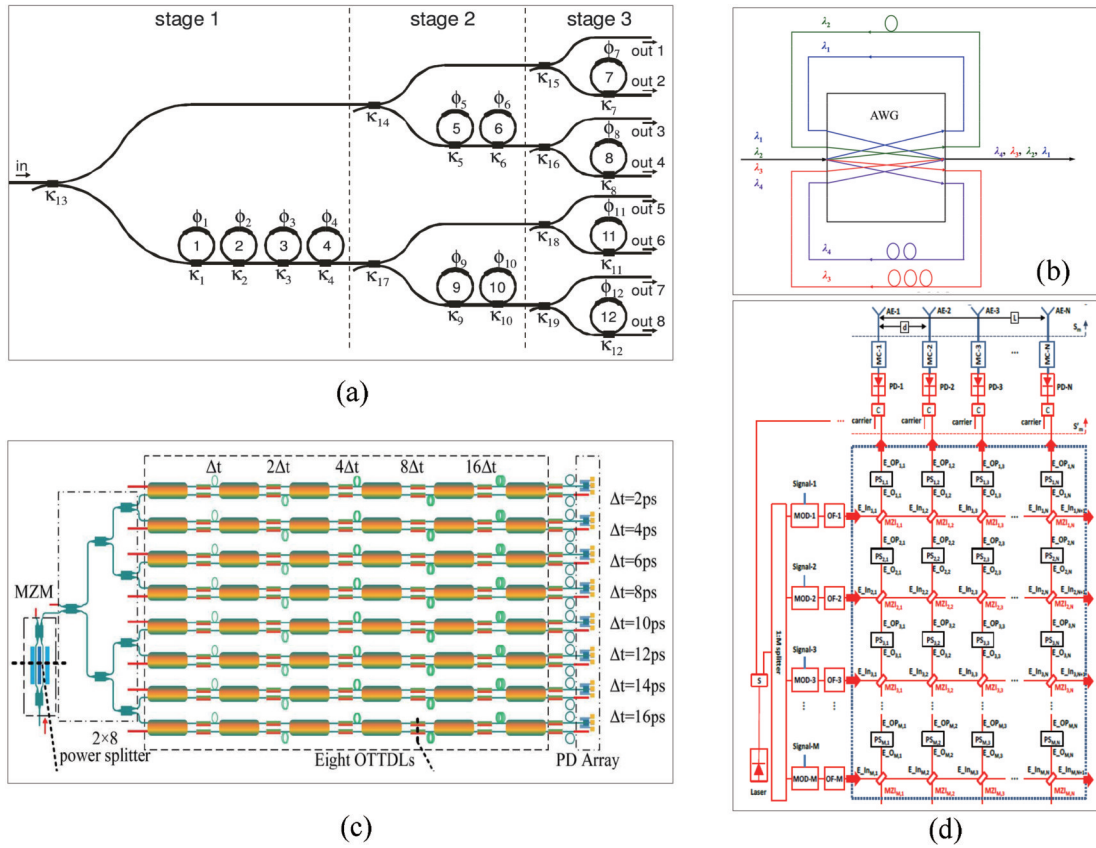


图 10 几种集成化波束形成方案。(a)基于光学谐振环^[37]; (b)基于AWG^[38]; (c)基于级联光开关^[39]; (d)基于Blass矩阵^[40]
 Fig. 10 Block diagrams of several integrated optical beamforming methods. (a) Based on optical ring resonator^[37]; (b) based on AWG^[38]; (c) based on cascaded optical switches^[39]; (d) based on Blass matrix^[40]

针对 26~40 GHz 的毫米波段对延时精度要求高、波束可调谐的问题,本课题组研制了基于色散光纤和可变光延迟线组合的可调谐同时多波束形成系统,如图 11(a)所示,该系统中的光纤色散和可调延时互为补充,具备复用性好、±30°大空域扫描、亚 ps 级延时精度的能力。测试 4 阵元、Ka 频段下的波束形成方向图,如图 11(b)所示,可以看出在 26~40 GHz 的宽频段

内无指向偏斜^[41]。为适应小型化发展需要,进一步研制了 8 通道光开关切换延时芯片,设计版图如图 12(a)所示^[42],该芯片基于热光效应进行开关控制,实现了光开关切换时间小于 100 μs、延时精度达±0.3 ps 的延时调控能力,将其嵌入到波束形成系统后实现了 4 阵元±15°空域扫描,如图 12(b)所示。

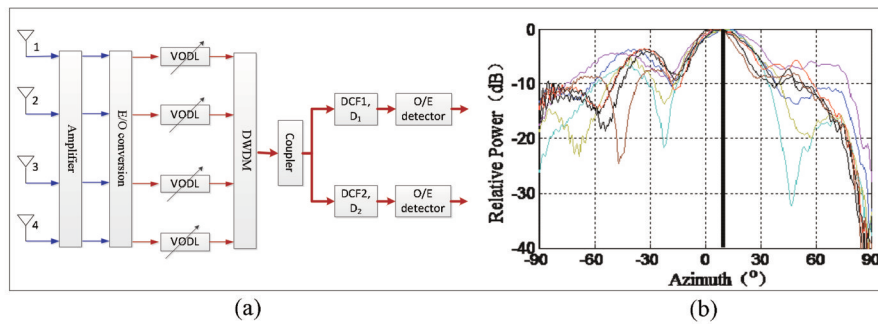


图 11 毫米波波束形成方案^[41]。(a)方案原理; (b)实测结果
 Fig. 11 Scheme of millimeter wave beamforming^[41]. (a) Schematic diagram of scheme; (b) measured result

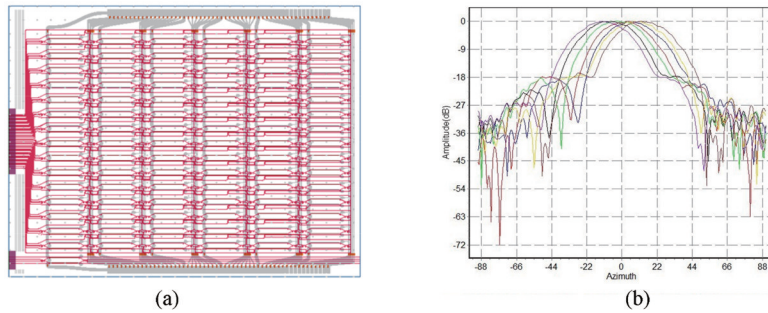


图 12 延时切换芯片设计^[42]。(a)设计版图;(b)嵌入芯片后的实测结果

Fig. 12 Delay switching chip design^[42]. (a) Design layout; (b) measured result by inserting chip

5.4 光学信道化技术

信道化的核心概念是将输入的宽带 RF 谱切分成多段,从而将超宽带信号的处理问题分解为多个并行的窄带信号处理问题。传统的射频信道化接收机各通道需要完全不同的滤波、混频等器件,不仅复用性差、器件规模大,且通道一致性不易保证。数字信道化接收机灵活度高、一致性强、数字滤波的边带滚降性能好,但是处理带宽受限于模数转换和现场可编程门阵列(FPGA)器件。相比之下,利用光学手段实现微波信号的信道化处理具有大带宽、并行处理等技术优势。

光学信道化处理方案可以分为非相干和相干处理两大类。连续分布信道的非相干光学信道化处理是最为简单直观的一种光学信道化接收机架构,其基本原理如图 13(a)所示^[43]。首先使用光频率梳将输入 RF 信号加载到每个光梳齿上,然后使用周期性光滤波器进行频带切分。最后,不同的波长通道经由波分解复用实现信道之间的物理分离。这种方法完全依靠光滤波器的通带特性进行频率分辨,不能知道信号的精确频率,在很多场合无法满足要求。

相干光学信道化通常将光源分为上下两个支路,一路用于调制待测微波信号,另一路用作本振光。通过相干光学拍差,可以在下变频的同时获得微波信号的精确频率。2012年,北京邮电大学徐坤团队^[44]提出了如图 13(b)所示的信道化方案,上下两路均采用相干的光频率梳,将上路加载待测 RF 信号后与不加载信号的光频率梳进行拍差。此时,每个信道输出的微波信号可以被精确地测定,实现了 500 MHz 信道带宽、频率范围为 3.75~7.25 GHz 的 RF 信道化处理。2018年,南京航空航天大学潘时龙团队^[45]进一步提出了带内干扰抑制解决方案,实验系统的瞬时带宽为 5 GHz (13~18 GHz),经信道化后分为 1 GHz 带宽的 5 个信道。带内干扰抑制达到 25 dB,系统的 SFDR 为 93 dB·Hz^{2/3}。2019年,意大利的研究人员将主激光器分为两路,一路用于调制待测 RF 信号,另一路作为光频率梳的起始信号。光频率梳注入到从激光器(SL)上以实现注入锁定,如图 13(c)所示。通过调谐主激光器(ML)的波长,加载了 RF 信号的边带在频谱上不断平移,从而使得宽带 RF 谱的不同子带被陆续下变频

到基带信号上来^[46]。这种方案对主激光器的波长稳定度要求较高。

本课题组基于相干双光频率梳和法布里-珀罗(FP)滤波器研制了光学信道化接收系统^[47-48],如图 14 所示,任意波形的宽带信号通过电光调制复制在信号光频率梳的每一根梳齿上,并经光学 FP 滤波器进行周期性滤波,当信号光频率梳 OFC1 和滤波器的自由频谱范围有微小差异时,滤波器的不同位置将顺序滤出所有窄带信道。OFC1 与本振光频率梳 OFC2 合并和解复用后,对应的每个信道都为中频输出,实现了微波下变频处理。实验测得的信道带宽为 500 MHz,瞬时带宽为 4 GHz,为了实现对小信号的高灵敏度检测,系统中级联了多级光放大器,导致系统被动态压缩,测得的 SFDR 为 84 dB·Hz^{2/3}。光频率梳的不同梳齿存在功率起伏,OFC1 的功率起伏小于 3 dB,而 OFC2 的功率起伏接近 8 dB,导致 8 个射频信道之间存在 4 dB 的幅度差异,通过提高光梳平坦性和使用射频衰减器,信道幅度一致性还可以进一步提升。

5.5 光电振荡器

目前电学方法产生的微波信号源使用倍频技术产生高频微波,其相位噪声在倍频过程中不断恶化。而光电振荡器(OEO)是一种采用光学方法产生微波/毫米波信号的技术,低损耗、长距离的光纤能够增加环路 Q 值,使得输出的微波信号具有优良的相位噪声性能。最初的 OEO 为单环结构,主要存在的问题为长距离光纤在实现低相噪微波输出的同时减小了模式间隔,导致滤波器无法滤出单个模式,使得输出信号的远端相噪差和起振频率不稳定。针对该问题,研究者们先后提出采用多环 OEO 降低远端相噪、采用耦合 OEO 缩短光纤长度、采用注入锁定提升频率稳定度等解决方法。之后,研究者们对 OEO 的研究逐渐聚焦于频率快速调谐、振荡模式稳定性、宽带适应性等方面,近年来也取得了很大进展。

对 OEO 的频率调谐最初受限于窄带微波滤波器的中心频率调谐能力,加拿大姚建平团队^[49]提出使用相位调制器结合具有窄带陷波能力的光栅实现微波信号的调制,通过调谐激光波长能够实现谐振频率的调谐,但调谐速度依赖于激光器的调谐能力。2017年,北京邮电大学首次在 OEO 环路中引入了快速调谐

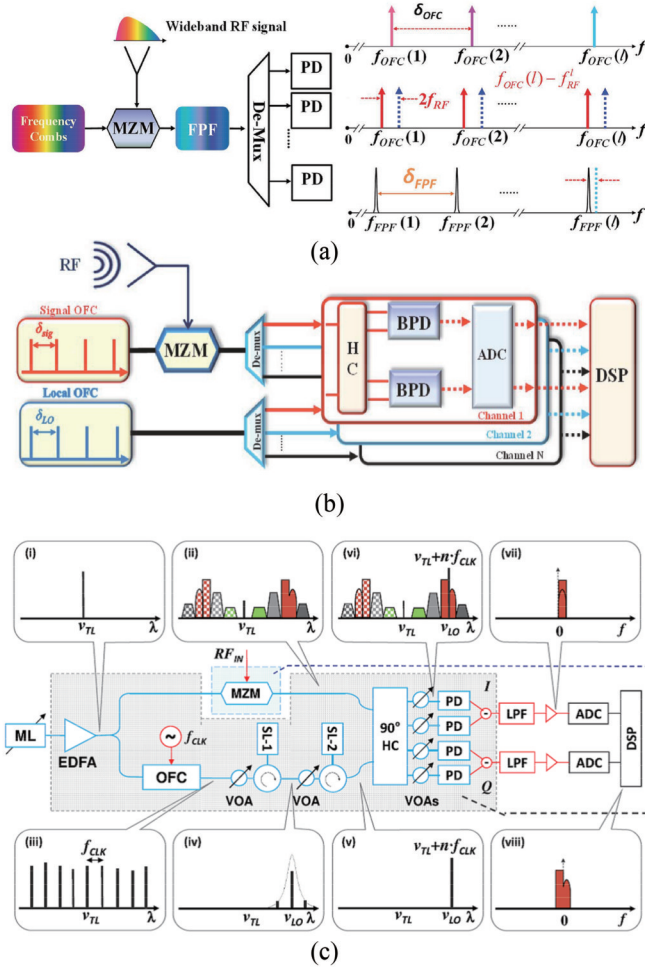


图 13 几种典型的光学信道化接收机架构示意图。(a)非相干信道化^[43];(b)基于双光梳(OFCs)的相干信道化^[44];(c)基于单光梳的相干信道化^[46]

Fig. 13 Several typical block diagrams of optical channelized receiver. (a) Non-coherent channelization^[43]; (b) coherent channelization based on dual OFCs^[44]; (c) coherent channelization based on single OFC^[46]

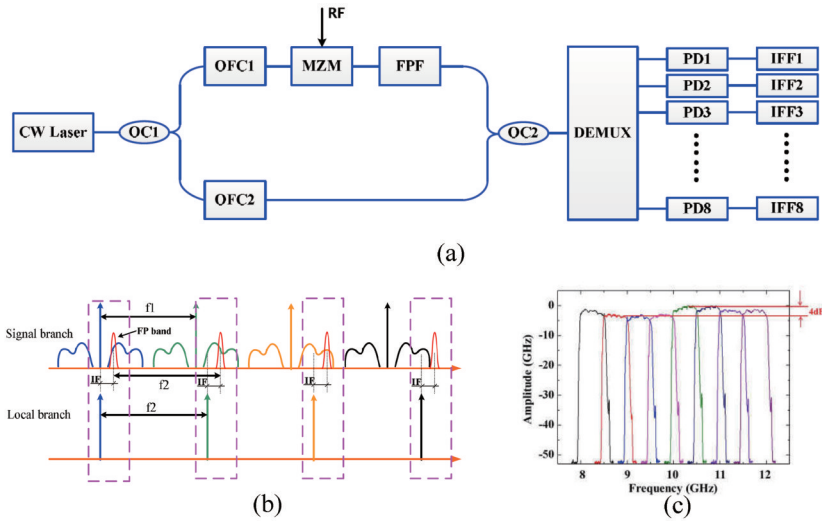


图 14 基于相干双光梳和 FP 滤波的信道接收系统^[47]。(a)系统结构示意图;(b)系统原理;(c)实测图

Fig. 14 Channelized receiving system based on coherent dual-combs and FP filter^[47]. (a) System configuration; (b) system principle; (c) measured results

的周期性微波滤波器,突破了传统 OEO 在产生频率捷变信号方面的限制,腔内能够支持大量模式的同时稳定振荡^[50]。2018 年,中国科学院半导体研究所李明团队^[51]进一步提出了基于傅里叶域锁模的可调谐光电振荡器,能够突破以往 OEO 中存在的模式建立时间限制。图 15(a)中的关键环节是为环路中构建一个可以实现快速、大范围扫频(GHz 量级)的周期性微波光子滤波器,环路延迟时间是滤波器中心频率调谐周期的整数

倍,此时环路可以输出宽带扫频信号。2017 年,北京大学陈章渊团队^[52]基于受激布里渊散射的反放大效应验证了 OEO 在 7~40 GHz 的调谐能力,在 10.3 GHz 时,10 kHz 频偏下的相位噪声为 -128 dBc/Hz。2018 年,南京航空航天大学潘时龙团队^[53]在环路中增加了一个半导体激光器作为从激光器,通过调谐其光强度实现频率调谐,能够获得带宽为 7 GHz、啁啾斜率为 0.18 GHz/ns、时间带宽积达 2804.2 的线性调频信号。

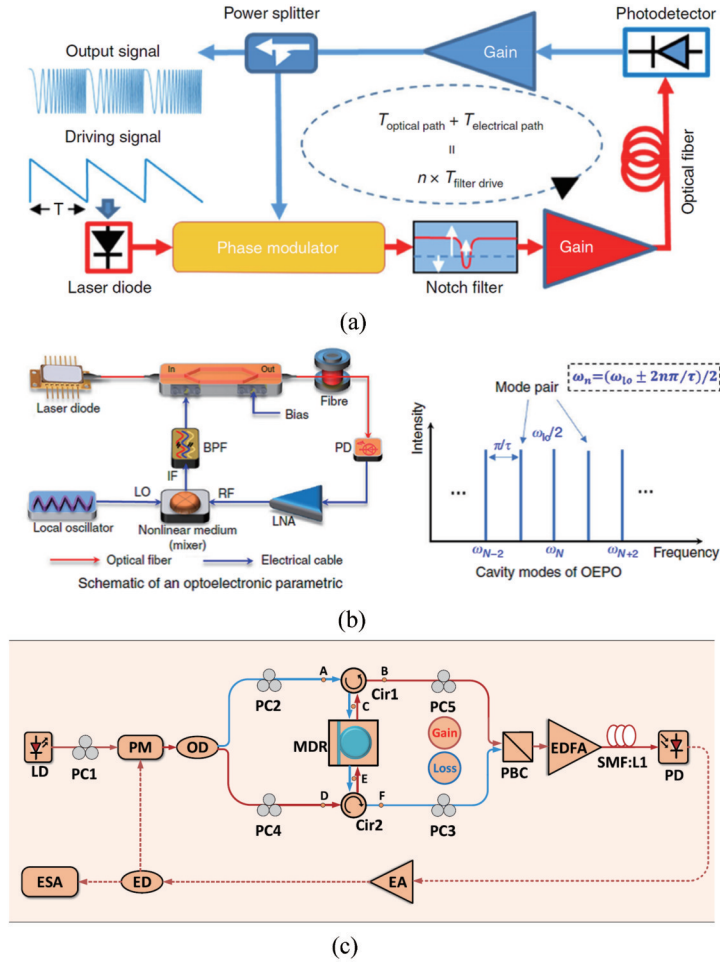


图 15 几种最新光电振荡器实现方案^[51,54-55]。(a)基于傅里叶域锁模的 OEO;(b)光电参量振荡器;(c)基于宇称-时间对称原理的 OEO
 Fig. 15 Several recent block diagrams of optoelectronic oscillator^[51,54-55]. (a) OEO based on Fourier domain mode locking; (b) optoelectronic parametric oscillator; (c) parity-time symmetric OEO

OEO 中的振荡信号直接从噪声中建立,没有从泵浦信号到振荡信号的能量转移过程,因此起振过程不可避免地存在模式的竞争和跳变。2020 年,中国科学院半导体研究所李明团队^[54]进一步提出了光电参量振荡器。图 15(b)中,在振荡环路中引入一个光学非线性媒介进行参量频率转换。通过调谐本振信号(LO)的频率或使用不同的带通滤波器(BPF)就可以调谐振荡频率,并且能够在环路形成稳定的单模或者多模振荡。同期,图 15(c)展示了一种基于宇称-时间对称原理的可调谐光电振荡器,利用硅基集成微盘振荡器的互易性实现了宇称-时间对称结构,能够降低对滤波器

带宽的需求,实现信号的稳定输出^[55]。
 在典型的 OEO 中,输出信号的最高频率受限于电光调制器的工作频段,为了降低对调制器工作带宽的要求,本课题组提出了一种利用电光调制器的非线性效应实现光电振荡器倍频输出的方法,通过在光电振荡环路中引入微波分频器,使得利用低频率的电光调制器可以产生高频的微波倍频信号输出:一方面通过控制谐波阶次实现频段的切换,另一方面谐波振荡也显著降低了对调制器调制带宽的要求^[56]。实验验证时仅采用了 1 km 的较短光纤,在 4.5 GHz 基频振荡工作时,相位噪声在 10 kHz 频偏时达到 -110 dBc/Hz,工作在 9 GHz

倍频信号时, 相位噪声在 10 kHz 频偏时达到 -104 dBc/Hz, 比典型光电振荡环路恶化了 6 dB,

和理论预期相同, 但其优势是输出功率保持不变和直接实现二次谐波输出。图 16 为谐波振荡 OEO 系统。

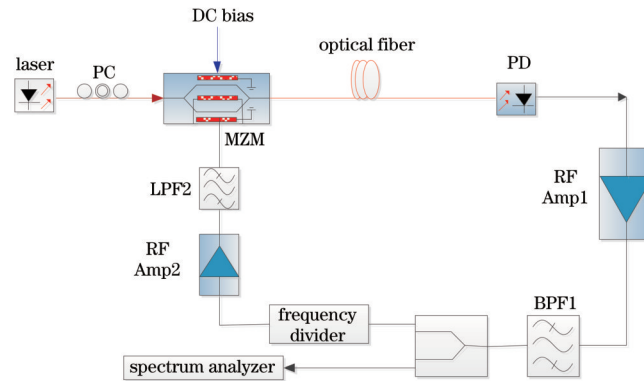


图 16 谐波振荡 OEO 系统

Fig. 16 Harmonic oscillating OEO system

6 结论与展望

综上所述, 近年来微波光子学经过高速发展, 其技术体系已经涵盖了信号的产生、传输、交换、分析、控制等多个方面, 并已经在雷达、通信、电子战等电子系统中实现了部分应用。所提出的面向多功能应用的超宽带阵列化微波光子系统架构从信号接收开始, 经历光电转换、信号传输、空域波束形成、频域信道化处理再到信号检测与参数提取的接收过程, 以及信号产生、波束形成、上变频的发射过程。重点回顾了架构中的关键环节, 即微波光子信号传输、稳相、波束形成、信道化和光电振荡器等技术的研究进展。面向未来, 我们认为微波光子技术及其系统应用将向以下方向发展:

1) 多功能。基于微波光子技术的雷达、通信、电子战等单功能系统已经分别得到了初步验证。而微波光子技术的宽带、并行、灵活交换等能力, 完全有可能将上述系统功能统一承载, 在超宽带阵列化条件下实现多功能可重构的电子系统。

2) 智能化。光子神经网络、深度学习辅助的微波光子处理等研究方向, 将使微波光子处理的智能化成为可能, 同时也将与多功能发展方向形成相互促进的发展态势。

3) 集成化。随着光电混合集成、硅基光子集成等技术的不断进步, 复杂微波光子处理单元将能够以集成化形态出现, 不仅使体积和重量减小, 而且可提升阵列信号处理的一致性和参数控制精度, 使微波光子系统的应用平台得到进一步扩展。

参 考 文 献

[1] Jager D, Kremer R, Stohr A. Travelling-wave optoelectronic devices for microwave applications[C]// Proceedings of 1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, May 16-20, 1995, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 1995: 163-167.

[2] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-

4641.

- [3] Yao J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Urick V J, McKinney J D, Williams K J. Fundamentals of microwave photonics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [5] Kittlaus E A, Eliyahu D, Ganji S, et al. A low-noise photonic heterodyne synthesizer and its application to millimeter-wave radar[J]. Nature Communications, 2021, 12: 4397.
- [6] Asaki Y, Maud L T, Fomalont E B, et al. ALMA high-frequency long baseline campaign in 2017: band-to-band phase referencing in submillimeter waves[J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 2020, 247(1): 23.
- [7] Pierno L. Photonic OBFN in Selex SI[EB/OL]. (2008-11-21) [2022-02-05]. <https://escies.org/webdocument/showArticle?id=807>.
- [8] Onori D, Azana J. A microwave photonic tunable receiver with digital feed-forward phase noise cancellation for electronic support measures and antenna remoting [C]//2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 22-25, 2018, Toulouse, France. New York: IEEE Press, 2018.
- [9] 周涛, 陈吉欣, 黄禾, 等. 声光频谱分析器的衍射理论解析[J]. 半导体光电, 2010, 31(4): 608-611.
- Zhou T, Chen J X, Huang H, et al. Analysis of acoustic-optical spectrum processor by wave-optics and diffraction theory[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(4): 608-611.
- [10] 周涛, 范保华, 陈吉欣. 光学波束形成技术对超宽带信号的传输特性分析[J]. 半导体光电, 2010, 31(3): 451-454, 458.
- Zhou T, Fan B H, Chen J X. Analysis of transmission characteristics of UWB signal using optical beam forming [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(3): 451-454, 458.
- [11] Tao Y S, Tao Z H, Shu H W, et al. Photonic-based fully integrated microwave instantaneous frequency

- measurement[C]//2021 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 24-27, 2021, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [12] Li G Y, Shi D F, Wang L, et al. Unambiguous measurement of AOA using a DDMZM[J]. *Optics Communications*, 2022, 514: 128132.
- [13] Anzalchi J, Wong J, Verges T, et al. Towards demonstration of photonic payload for telecom satellites [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 111804T.
- [14] Airbus. Airbus to build BADR-8 satellite for Arabsat with optical communications payload TELEO[EB/OL]. (2020-08-18)[2022-08-01]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-08-airbus-to-build-badr-8-satellite-for-arabsat-with-optical>.
- [15] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [16] Zhang F Z, Guo Q S, Wang Z Q, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274-16281.
- [17] Zhang F Z, Guo Q S, Zhang Y, et al. Photonics-based real-time and high-resolution ISAR imaging of non-cooperative target[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 112801.
- [18] Li R M, Li W Z, Ding M L, et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14334-14340.
- [19] Wang A L, Zheng D K, Du S R, et al. Microwave photonic radar system with ultra-flexible frequency-domain tunability[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13887-13898.
- [20] Deroba J C, Schneider G J, Schuetz C A, et al. Multifunction radio frequency photonic array with beam-space down-converting receiver[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 2746-2761.
- [21] Liang D D, Jiang L Z, Chen Y. Multi-functional microwave photonic radar system for simultaneous distance and velocity measurement and high-resolution microwave imaging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6470-6478.
- [22] Zhang Y M, Liu C, Zhang Y, et al. Multi-functional radar waveform generation based on optical frequency-time stitching method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 458-464.
- [23] Zhu W W, Hu J J, Gu Y Y, et al. Dynamic range improvement of a microwave photonic link based on Brillouin processing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23): 2681-2684.
- [24] Zhu W W, Zhao M S, Fan F, et al. Sagnac interferometer-assisted microwave photonic link with improved dynamic range[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 5500909.
- [25] Han X Y, Chen X, Yao J P. Simultaneous even- and third-order distortion suppression in a microwave photonic link based on orthogonal polarization modulation, balanced detection, and optical sideband filtering[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14812-14827.
- [26] Leibel R G, Ynoquio L H, Pierre V D W J, et al. Linearized electro-optical modulation with concurrent transmissions[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [27] Zhang W, Wen A J, Xu X Y, et al. Dual-wavelength linearization of analog photonic link based on PM-IM conversion[J]. *Optics Communications*, 2018, 420: 174-178.
- [28] Wu R H, Jiang T W, Yu S, et al. Multi-order nonlinear distortions analysis and suppression in phase modulation microwave photonics link[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(24): 5973-5981.
- [29] 崔岩, 徐嘉鑫, 杨振, 等. 基于微波光子相干接收的宽带射频前端技术[J]. *半导体光电*, 2022, 43(1): 84-88.
- Cui Y, Xu J X, Yang Z, et al. Broadband RF frontend technique based on coherent heterodyne detection in microwave photonics[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(1): 84-88.
- [30] Wang H J, Xue X X, Li S Y, et al. All-optical arbitrary-point stable quadruple frequency dissemination with photonic microwave phase conjugation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 5501508.
- [31] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441-444.
- [32] Dix-Matthews B P, Schediwy S W, Gozzard D R, et al. Point-to-point stabilized optical frequency transfer with active optics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 515.
- [33] Li Q, Hu L, Zhang J B, et al. Fiber radio frequency transfer using bidirectional frequency division multiplexing dissemination[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(13): 660-663.
- [34] Jiang M Y, Chen Y Q, Cheng N, et al. Multi-access RF frequency dissemination based on round-trip three-wavelength optical compensation technique over fiber-optic link[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 7202808.
- [35] Chen Z Y, Zhou T, Zhong X, et al. Stable downlinks for wideband radio frequencies in distributed noncooperative system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4514-4518.
- [36] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019: 13: 80-90.
- [37] Zhuang L M, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas: part II: experimental prototype[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 19-31.
- [38] Hu G H, Cui Y P, Yang Y D, et al. Optical beamformer based on diffraction order multiplexing (DOM) of an arrayed waveguide grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 2898-2904.

- [39] Zhu C, Lu L J, Shan W S, et al. Silicon integrated microwave photonic beamformer[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1162-1170.
- [40] Tsokos C, Mylonas E, Groumas P, et al. Analysis of a multibeam optical beamforming network based on Blass matrix architecture[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3354-3372.
- [41] Liu J X, Zhong X, Chen Z Y, et al. Tunable optical beam-forming network for millimeter wave using VODL [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11068: 1106816.
- [42] Liu J X, Long M H, Zhong X, et al. A photonic beamformer based on integrated optical delay line[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 117637V.
- [43] Xie X J, Dai Y T, Ji Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 661-663.
- [44] 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.
- [45] Tang Z Z, Zhu D, Pan S L. Coherent optical RF channelizer with large instantaneous bandwidth and large in-band interference suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4219-4226.
- [46] Ghelfi P, Scotti F, Onori D, et al. Photonics for ultrawideband RF spectral analysis in electronic warfare applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 8900209.
- [47] Zhong X, Chen Z Y, Liu J X, et al. A wideband optical channelized receiver based on coherent optical frequency combs and Fabry-Perot filter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11068: 1106814.
- [48] 钟欣, 王云新, 李文亮, 等. 基于级联调制器的光梳的平坦度理论研究[J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 461-466.
- Zhong X, Wang Y X, Li W L, et al. Theoretical research on the flatness of optical frequency comb based on cascaded modulators[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 461-466.
- [49] Yao J P. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3489-3497.
- [50] Cen Q Z, Dai Y T, Yin F F, et al. Rapidly and continuously frequency-scanning opto-electronic oscillator [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 635-643.
- [51] Hao T F, Cen Q Z, Dai Y T, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1839.
- [52] Peng H F, Xu Y C, Peng X F, et al. Wideband tunable optoelectronic oscillator based on the deamplification of stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10287-10305.
- [53] Zhou P, Zhang F Z, Pan S L. Generation of linear frequency-modulated waveforms by a frequency-sweeping optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3927-3934.
- [54] Hao T F, Cen Q Z, Guan S H, et al. Optoelectronic parametric oscillator[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 102.
- [55] Fan Z Q, Zhang W F, Qiu Q, et al. Hybrid frequency-tunable parity-time symmetric optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2127-2133.
- [56] 刘静娴, 周涛, 钟欣, 等. 一种倍频光电振荡器的实现方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806002.
- Liu J X, Zhou T, Zhong X, et al. Implementation method of a frequency-doubling optoelectronic oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806002.

约稿专家简介:



周涛(1978—), 博士, 研究员级高级工程师, 科技部中青年创新创业领军人才, 国防卓越青年科学基金获得者, 四川省学术与技术带头人。1998年9月考入浙江大学光电工程系硕博连读, 2003年6月研究生毕业获博士学位; 现任中国电子科技集团公司首席专家, 长期从事微波光子处理及新体制电子系统的科研工作, 主要研究方向包括超宽带微波光子链路、光学多波束形成和光控阵列系统等。主持国防基础科研重大项目、基础加强重大项目、国家重点研发计划和国家自然科学基金面上项目等十余项项目, 研究成果获得国家发明二等奖、中国光学工程学会科技进步一等奖等奖项。E-mail: zhj_zht@163.com。