

微波光子检测 (特邀)

卢冰^{1,2}, 邹喜华^{1*}

- (1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都 611756;
2. 重庆邮电大学信息与通信工程学院, 重庆 400065)

摘要: 微波信号检测是电子信息领域的关键技术, 广泛应用于通信、雷达、电子战。随着新一代信息技术的快速发展, 现有的微波测量系统面临着速率和带宽瓶颈。微波光子学技术融合了微波和光波技术各自优势, 具有大带宽、低损耗、抗电磁干扰等优势, 文中围绕微波光子检测, 特别是微波光子信号的频率测量方案, 如频率-幅度映射型、频率-时间映射型、光信道化型等, 介绍与分析国内外现状与发展动态, 并对现有微波光子测量面临的问题和下一步发展方向进行了简单总结。

关键词: 微波光子学; 微波光子检测; 光电信号处理

中图分类号: TN957; TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211044

Photonic microwave measurements (*Invited*)

Lu Bing^{1,2}, Zou Xihua^{1*}

- (1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Microwave signal detection and analysis are the key technologies for electrical information systems like communication, radar, electronic warfare. With the rapid development of new information technology, microwave photonic technology combines the advantages of both lightwave and microwave, which is characterized by the advantages of large bandwidth, low loss and anti-electromagnetic interference. In this paper, a comprehensive overview of the microwave photonic measurements, especially photonic-assisted microwave frequency measurement schemes based on frequency-amplitude mapping, frequency-to-time mapping, and Optical channelization was introduced. In addition, the corresponding problems and prospects were briefly summarized.

Key words: microwave photonics; photonic microwave measurements; optical and electrical signal processing

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (61922069, 62001072); 国家 863 计划 (2015AA016903)

作者简介: 卢冰, 男, 讲师, 博士, 主要从事微波光子信号处理与测量方面的研究。

通讯作者: 邹喜华, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微波光子学、光通信与器件、集成光子学等领域的教学科研工作。

0 引言

微波信号检测是电子信息系统的核心技术,广泛应用于通信、雷达、电子战等领域,涉及到频率、幅度、相位、脉冲宽度、调制制式在内的多维参量测量,以及微波信号作为媒介对目标物体的速度、距离、位置、成像测量^[1-2]。随着新一代信息技术的快速发展和应用场景的日新月异,微波测量系统正向宽带、高频、智能化方向发展。在民用通信中,以高清视频、AR、VR、物联网、人工智能、自动驾驶等新兴业务的快速涌现,通信信号的频段节节攀升,瞬时带宽已覆盖 GHz 到几十 GHz;在国防军事中,新一代雷达、预警设备、以及电子对抗设备的大量使用,使得微波信号频谱覆盖极宽、电磁干扰严重。受限于电子瓶颈问题,传统的电子学方法和技术在处理高频、宽带信号受到诸多限制,如体积庞大、高频损耗高、瞬时带宽小、电磁干扰严重。微波光子学融合了微波和光波技术的各自优势,具有大带宽、低损耗、抗电磁干扰以及可并行处理等本征特征,有望解决宽带微波信号测量面临的上述难题^[3-4]。因此,近些年微波光子测量技术受到了人们的普遍关注。

微波光子学关键参数测量原理图如图 1 所示,待测微波信号经电光调制器加载到光载波上调制,调制后的光边带进入光域处理单元中进行处理(如滤波、延迟、非线性效应等),而后进入到光电探测器执行光电转换,通过对探测后的电流信号进行处理和分析,得到微波信号的关键参数信息。目前研究人员主要集中于微波信号频谱测量研究,并以此估算出幅度、脉冲宽度、调制格式等其他参量信息。根据测量机理,微波光子检测可以分为频率-幅度映射型^[5-8]、频率-时间映射型^[9-16]、信道化型^[17-22]三类。

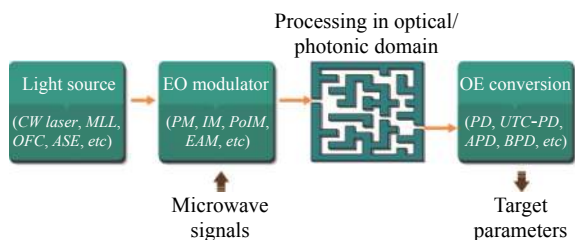


图 1 微波光子检测系统示意图^[1]

Fig.1 General configuration for photonic microwave measurements^[1]

1 频率-幅度映射型检测

频率-幅度映射型测频的物理机制是利用色散介质或者时延干涉介质将加载在光载波的射频信号进行谱线分离或者滤波,构建功率衰减函数,以此推断射频信号的频率大小。根据光电转换后信号的类型可以分为频率-微波功率映射型和频率-光功率(或直流)映射型两种方案。空军工程大学和中国科学院大学研究人员利用相位调制器和马赫曾德尔干涉仪构建基于微分器的光子瞬时频率测量系统,通过检测光电转换后的微波功率,推测微波信号的频率,在 0.1~25 GHz 的频率范围内测量误差低于 3%^[5]。南京航空航天大学 and 渥太华大学研究人员利用硅基 Fano 谐振环对载波抑制的单边带光载微波信号进行滤波,通过检测光功率得到幅度比函数,推测待测微波信号的频率信息,在 3~18 GHz 的测量范围内,测量误差小于 0.5 GHz^[6]。西南交通大学研究人员利用光干涉仪对复杂调制微波信号的频率、脉冲幅度、脉冲宽度、调制格式测量,测量范围达 5~28 GHz^[7]。该类微波感知方案覆盖频带宽、响应时间短、结构简单,但是该类方案同一时刻只能感知单载波信号。进一步地,他们研发一种通用微波光子芯片,实现了频率、脉冲宽度、以及电磁干扰检测等多个参数测量以及功能验证^[8]。

2 频率-时间映射型检测

频率-时间映射型方案将待测微波信号的频谱信息转为时间信息,进而从探测电信号的时间信息估测出频谱信息,可以分为光域扫描或者光域傅里叶变换两种方式。光域扫描可以通过光源扫描或者滤波响应扫描,诸如,悉尼大学和西南交通大学研究人员利用片上的布里渊滤波器,通过扫描泵浦源改变片上布里渊滤波器响应的中心频率,同时结合频率-微波功率映射原理,实现对待测微波信号的频率测量,在 0~38 GHz 范围实现了小于 1 MHz 的测量误差^[9]。华中科技大学的研究人员利用片上硅基微环谐振器的高 Q 值扫描滤波器,在 1~30 GHz 范围内实现多种类型微波信号的频率测量^[10]。随后,上海交通大学、南京航空航天大学的研究人员将深度学习引入到光域扫描式测频系统中进一步改善测量精度^[11-12]。扫描

式测频方案可在宽带范围实现多个频率的检测,但面临扫描时间、截获概率、测量精度相互制约问题,难以同时对多频点信号进行实时测量与分析。光域傅里叶变换基于时间透镜方法,利用时空对称原理,由相位或者强度调制器作为时间透镜,将待测微波信号加载到经色散介质拉升的光脉冲上,而后进入到一段相同负色散介质中进行脉冲压缩,经光电探测后得到的时域波形与待测微波信号的频谱成线性关系。最近,上海交通大学研究人员利用单模光纤作为色散介质设计光子压缩接收机,实现了 42 GHz 的有效测量带宽,测量分辨率为 1.2 GHz,信号的截获周期为 27 ns^[13]。为了改善时间孔径、测量分辨率相互制约问题,研究人员通过频移反馈方法^[14-15]、射频带宽放大^[16]方法实现了 MHz 以下的测量精度。

3 微波光子信道化检测

微波光子信道化接收机将天线接收到的射频信号加载到光载波上,在光域上实现微波信号的频段划分,将宽谱信号分为多个窄带光谱并行处理,便于电域的精细处理,满足智能系统对宽带微波多载波信号测量要求。根据电光调制后解调方式分为直接检测型和相干检测型。

直接检测型通常利用光信道化滤波器,如声光型信道化滤波器、自由空间衍射光栅、相移光纤光栅将射频信号的频谱成分在光域中被滤波器分离成多个并行信道,不同信道的光信号直接通过光电探测器进行光电转换,得到各信道内微波信号包络,大致推测出微波信号的频谱信息。最近澳大利亚斯威本科技大学研究人员利用单个光学频率梳(OFC)和基于微环谐振器的周期光滤波器构建了 92 个滤波信道,滤波分辨率为 121.4 MHz 的微波信道化接收系统^[17]。北京邮电大学利用两个相干 OFC 和相干解调技术有效解决了直接检测型的频域精细滤波和波长对准问题,实验中获得 20 个带宽为 1 GHz 的信道,频率覆盖 0~20 GHz^[18]。进一步地,该课题组利用啁啾光脉冲与自身时延拍频产生可调电本振,将 DC~20 GHz 范围内分成 200 个信道,单信道带宽为 100 MHz^[19]。南京航空航天大学研究人员利用双输出的镜像混频器,在 OFC 梳齿个数一定的情况下,信道个数提升为原来 2 倍^[20]。此外,清华大学、意大利国家光子网络实验

室和埃因霍温理工大学研究人员分别利用时分复用方式结合相干检测方式实现了时分式微波信道化频率测量,简化了系统结构^[21-22]。

4 结 论

微波光子检测技术具有大带宽、可重构、并行处理以及小型化等优势。尽管如此,微波光子测量在系统指标提升、转换能效、集成度、动态范围、可靠性等方面与实际要求还有差距,需要从集成化、智能化加以重点攻关和突破。

参考文献:

- [1] Zou Xihua, Lu Bing, Pan Wei, et al. Photonics for microwave measurements [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 711-734.
- [2] Pan Shilong, Yao Jianping. Photonics-based broadband microwave measurement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3498-3513.
- [3] Pan Shilong, Zhang Yamei. Microwave photonic radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [4] Lam Anh Bui. Recent advances in microwave photonics instantaneous frequency measurements [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2020, 69: 100237.
- [5] Lin Tao, Zou Canwen, Zhang Zhike, et al. Differentiator-based photonic instantaneous frequency measurement for radar warning receiver [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 3942-3949.
- [6] Zhu Beibei, Zhang Weifeng, Pan Shilong, et al. High-sensitivity instantaneous microwave frequency measurement based on a silicon photonic integrated Fano resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2527-2533.
- [7] Lu Bing, Pan Wei, Zou Xihua, et al. Photonic-assisted real-time intra-pulse parameters measurement of complex microwave signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(17): 3633-3644.
- [8] Zou Xihua, Zou Fang, Cao Zizheng, 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.
- [9] Jiang Hengyun, David Marpaung, Mattia Pagani, et al. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 30-34.

- [10] Wang Xu, Zhou Feng, Gao Dingshan, et al. Wideband adaptive microwave frequency identification using an integrated silicon photonic scanning filter [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 172-181.
- [11] Zou Xiuting, Xu Shaofu, Li Shujing, et al. Optimization of the Brillouin instantaneous frequency measurement using convolutional neural networks [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5723-5826.
- [12] Zhou Yuewen, Zhang Fangzheng, Shi Jingzhan, et al. Deep neural network-assisted high-accuracy microwave instantaneous frequency measurement with a photonic scanning receiver [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3038-3041.
- [13] Wang Sitong, Wu Guiling, Sun Yiwei, et al. Photonic compressive receiver for multiple microwave frequency measurement [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25364-25373.
- [14] Zheng Yan, Li Jilong, Dai Yitang, et al. Real-time Fourier transformation based on the bandwidth magnification of RF signals [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 194-197.
- [15] Schnebelin Come, de Chatellus Hugues Guillet. Agile photonic fractional Fourier transformation of optical and RF signals [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 907-910.
- [16] Zhang Hongzhi, Marc Brunel, Marc Vallet, et al. Optical frequency-to-time mapping using a phase-modulated frequency-shifting loop [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2336-2339.
- [17] Xu Xingyuan, Tan Mengxi, Wu Jiayang, et al. Broadband photonic RF channelizer with 92 channels based on a soliton crystal microcomb [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5116-5121.
- [18] Hao Wenhui, Dai Yitang, Zhou Y, et al. Coherent wideband microwave channelizer based on dual optical frequency combs [C]//IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference, 2016: 183-184.
- [19] Hao Wenhui, Dai Yitang, Zhou Y, et al. Chirped-pulse-based broadband RF channelization implemented by a mode-locked laser and dispersion [J]. *Optics Letters*, 2018, 42(24): 5234-5237.
- [20] Chen Wenjuan, Zhu Dan, Xie Chenxu, et al. Microwave channelizer based on a photonic dual-output image-reject mixer [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(16): 4052-4055.
- [21] Li Ruiyue, Chen Hongwei, Cheng Lei, et al. Optical serial coherent analyzer of radiofrequency (OSCAR) [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13579-13585.
- [22] Daniel Onori, Filippo Scotti, Francesco Laghezza, et al. A photonic enabled compact 0.5-28.5 GHz RF scanning receiver [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(10): 1831-1839.