

激光与光电子学进展

超快微波光子学频率测量技术(特邀)

王赫楠^{1*}, 陈亮¹, 齐永光¹, 巴德欣^{2,3}, 董永康^{2,3**}¹北京控制与电子技术研究所, 北京 102300;²哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;³哈尔滨工业大学郑州研究院, 河南 郑州 450000

摘要 微波光子学频率测量技术利用光学结构和技术产生、操纵、传输和测量高速微波射频信号, 将光子学的高带宽、高复用、低损耗与微波技术的高精细、灵活性和易调控等优势相融合, 能够大幅提升现有动态频谱监测系统的性能, 在电磁空间安全防护、雷达、高速通信等领域具有显著的优势和应用前景。本文概述了微波光子学频率测量技术的研究进展, 对比了包括频谱分析型、功率映射型和信道型等 3 种微波光子学频率测量技术的测频速度、测频精度等关键指标, 并论述了基于光学啁啾链瞬态受激布里渊散射效应的微波光子频率测量技术研究工作。

关键词 微波光子学; 超快微波频率测量; 频谱分析; 功率频率映射; 信道; 光学啁啾链

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232641

Ultrafast Microwave Photonics Frequency Measurement Technology (Invited)

Wang Henan^{1*}, Chen Liang¹, Qi Yongguang¹, Ba Dexin^{2,3}, Dong Yongkang^{2,3**}¹Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 102300, China;²State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, Heilongjiang, China;

³Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450000, Henan, China

Abstract Microwave photonics frequency measurement technology uses optical structure and technology to generate, manipulate, transmit and measure high-speed microwave, and combines the advantages of high bandwidth, high reuse and low loss of photonics with the advantages of high precision, flexibility and easy regulation of microwave technology, which can greatly improve the performance of existing dynamic spectrum monitoring systems. It has significant advantages and application prospects in electronic countermeasures, radar, high-speed communication and other fields. In this paper, the research progress of microwave photonics frequency measurement technology is summarized, and the key indicators of frequency measurement speed and precision of three kinds of microwave photonics frequency measurement technology, including spectrum analysis, power mapping and channel type, are compared. Finally, the research work of microwave photon frequency measurement technology based on optical chirped chain transient stimulated Brillouin scattering effect is discussed.

Key words microwave photonics; ultrafast microwave frequency measurement; spectrum analysis; power-frequency mapping; channelization; optical chirped chain

1 引言

微波频率测量技术是频谱监测系统中的关键技术之一, 在雷达、航空航天等高速通信领域通过测量微波信号频率, 能够分析待测信号频谱位置和资源占用情况, 区分待测信号和非期望信号, 或者分析信号发生源的静态或动态特点等, 实现电磁空间的安全管理与防

护等。传统的电学微波频率测量技术利用模数转换模块将采集得到的微波信号转变为数字信号, 结合短时傅里叶变换、小波变换等数字信号处理方法, 得到待测微波的频率信息。但是, 随着 5G 高速通信、物联网、新一代雷达等技术的出现, 微波信号逐渐向高频域、宽带宽、窄脉冲的形式发展, 纯电学系统受器件带宽、高频线缆传输损耗等因素的限制, 在这些新兴领域难以实

收稿日期: 2023-12-08; 修回日期: 2023-12-25; 录用日期: 2023-12-27; 网络首发日期: 2023-12-30

通信作者: *wanghenan1994@126.com; **aldendong@163.com

现进一步的突破。

微波光子学频率测量技术指的是利用光学结构和技术产生、操纵、传输和测量高速微波射频信号,将光子学的高带宽、高复用、低损耗与微波技术的高精细、灵活性和易调控等优势相融合,能够大幅提升现有动态频谱监测系统的性能,具有相当大的应用前景,因此近些年受到了广泛关注和研究。微波光子学频率测量技术原理如图 1 所示。采集得到的微波信号通过光频调制加

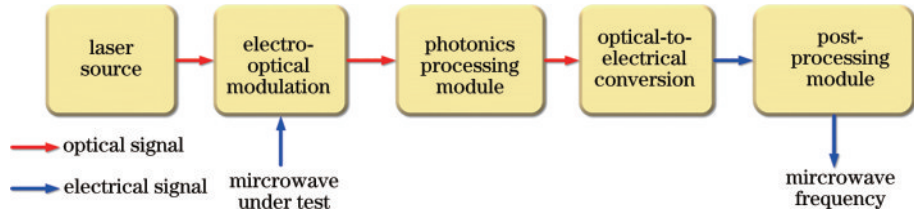


图 1 微波光子学频率测量技术原理

Fig. 1 Principle of microwave photonics frequency measurement technology

超快微波光子学频率测量技术是指在超短时间内完成微波频率测量,在对微波信号的频率、时间信息联合分析时能够获得更高的时间分辨率,对于捕捉高速变化或短脉冲等新形式的微波信号更有优势,进而拓宽微波频率测量技术的应用领域。本文概述现有 3 种典型的微波光子学频率测量技术,包括频谱分析、功率映射和信道,并对比了不同技术的测量速度、测频精度等关键指标,随后论述了基于光学啁啾链瞬态受激布里渊散射的超快微波光子学频率测量技术的研究工作。

2 微波光子学频率测量技术进展

2.1 频谱分析

频谱分析型微波光子学频率测量技术指的是通过光域扫频、逐点记录每个频率下的信号幅值实现微波频率测量。光域扫频最直接的办法是扫描光源,但可供扫频的可调谐激光器在扫频过程中输出光波长稳定性差,影响测频精度。因此更为有效的光源扫描办法是使用固定波长光源、配合可精细扫描的滤波器,如可调法布里-珀罗 (FP) 滤波器^[1]、扫描光栅^[2]、阶梯衍射

载在光载波上,在光域完成信号传输,处理后通过光电转换恢复成电信号,最终采集电信号解调得到微波频率。在微波光子学系统中,通常选择光纤作为光传输介质代替电缆传输,具有传输带宽大、传输损耗低并且抗电磁干扰的优势。另外,作为光电转换模块的光探测器相较于电学探测器能够突破探测带宽的限制,或者通过优化光子学处理方法,使光探测器输出结果为直流或低频交流信号,能够大大降低电学采集模块的带宽需求。

光栅^[3]、电控可调光纤光栅^[4]和布里渊滤波器^[5-11]等。目前,还有一种技术路线是利用波长固定光源结合基于 IQ 电光调制器的光波频率调制的光频扫描技术,这类技术路线的特点是扫频带宽主要受电光调制器的带宽限制,目前在 110 GHz 以下,但是频率分辨率能够达到 Hz 量级^[12]。

频谱分析型微波光子学频率测量技术的测频范围和测频精度分别由扫频范围和扫频精细度决定,技术发展方向也主要针对这两项关键指标进行提升。在早期的工作中,通过选择宽谱可调谐的滤波器或光栅来获得更大的测频范围。1999 年, Winnall 等^[1]提出基于可调 FP 滤波器的微波光子频谱分析方案,通过扫描 FP 腔长实现光域扫频,实验装置如图 2 所示,测频范围能够覆盖 15 GHz。2009 年, Pelusi 等^[2]利用自由空间扫描光栅实现微波光子频谱分析,测频范围扩展到光域。但空间光学系统增加了体积和成本,2009 年, Guo 等^[3]提出基于片上阶梯衍射光栅的微波光子频谱分析方案,使用具有 15 个通道的单片集成阶梯衍射光栅,每个通道单独扫描的频率范围覆盖 0~15 GHz,

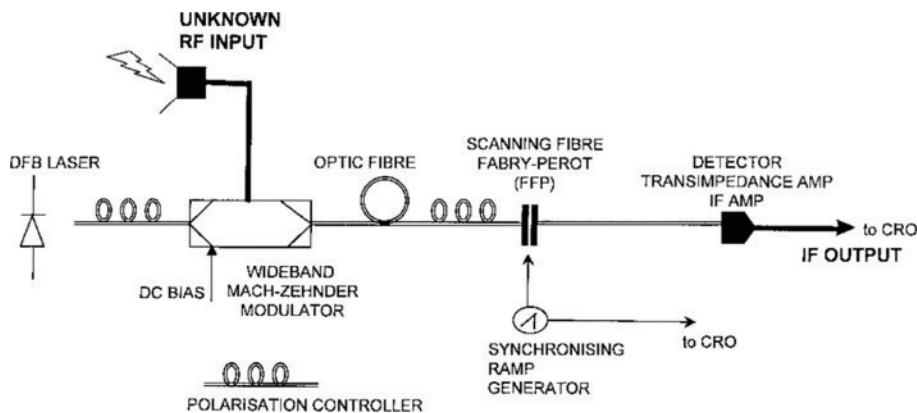


图 2 基于可调 FP 滤波器的微波光子频谱分析^[1]

Fig. 2 Photonics microwave spectrum analysis based on tunable FP filter^[1]

15 个通道全部使用时测频范围能够达到 225 GHz。

在此基础上,通过优化扫描滤波器带宽提升测频精度指标。2009 年, Rugeland 等^[4]利用窄带宽可调谐光纤布拉格衍射光栅(FBG)滤波器将频率分辨率提升至 54 MHz, 频率范围覆盖 2~9 GHz。2012 年, Zheng 等^[5]利用受激布里渊散射(SBS)效应中布里渊频谱窄带宽、可调谐的特性,将其作为扫描滤波器优化频谱分析的测频精度,如图 3 所示,探测光加载待测微波与泵浦光相向入射光纤,泵浦光通过外调制技术扫频,当泵浦光和探测光之间频差等于光纤的布里渊频移时,探测光强被增益或衰减,通过监测探测光强变化

并结合泵浦光的频率,实现微波频率测量。该方案将频率分辨率提升至 20 MHz,但是受调制边带限制测频范围仅覆盖 2~9 GHz。2017 年, Long 等^[6]使用单边带调制器加载待测微波,通过外调制技术对探测光扫频,将测频范围扩展到 27.5 GHz。2022 年, Mian 等^[7]使用砷化镓(GaAs)IQ 双并行马赫-曾德尔调制器(MZM)提高 SBS 的增益效果以及布里渊频谱的调谐能力,增益提升至~70 dBm,布里渊频谱谱宽在 20~40 MHz 间可调谐。此外,通过 SBS 增益和损耗区间叠加的方法压缩布里渊频谱谱宽^[8-10],可进一步提高频率分辨率。

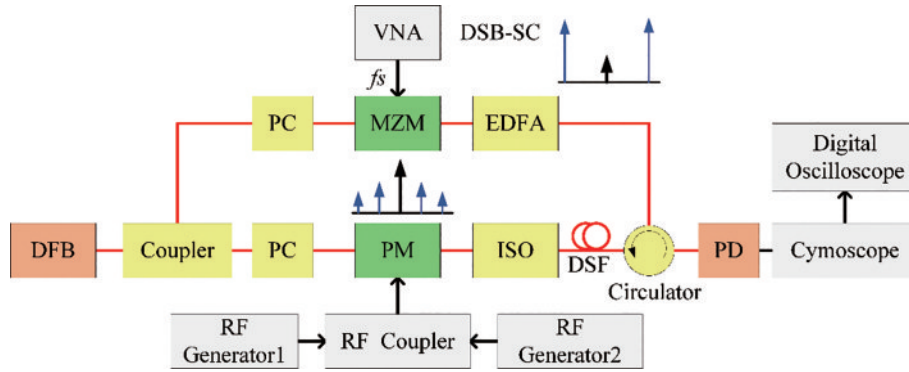


图 3 基于 SBS 效应的微波光子频谱分析^[5]

Fig. 3 Photonics microwave spectrum analysis based on SBS effect^[5]

利用布里渊频谱作为可调谐滤波器,滤波器的中心频率依赖于光纤的布里渊频移,为了防止环境温度和光纤所受应变改变对布里渊频移造成影响而引入测量误差,在测量过程中需要注意光纤隔离保护,以防止温度、振动等因素的影响。2016 年, Jiang 等^[11]进一步优化系统,使用集成芯片代替光纤作为 SBS 介质,相较于光纤,集成芯片的布里渊增益系数更高、体积小、

光程短,受环境噪声影响更小。具体方案如图 4 所示,探测光加载待测微波同时泵浦光通过外调制扫频,二者相向进入片上波导结构发生 SBS 作用。这里泵浦光扫频步长大于布里渊频谱谱宽,因此频率分辨率由泵浦光扫频步长决定,为 25 MHz,测频范围覆盖 9~38 GHz。另外,还利用增益谱和损耗谱响应构建幅值比较函数,将测频精度提升至 1 MHz。

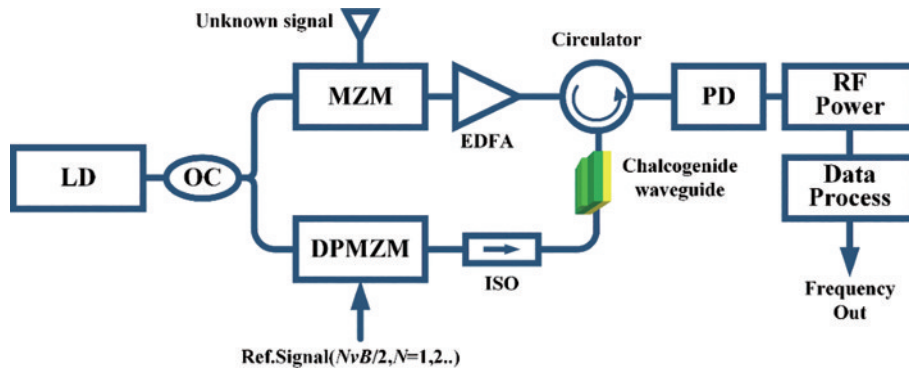


图 4 基于片上布里渊滤波器的微波光子频谱分析^[11]

Fig. 4 Photonics microwave spectrum analysis based on on-chip Brillouin filter^[11]

2.2 功率映射

功率映射型微波光子学频率测量技术指的是通过光学手段测量、比较频率-功率响应获得幅值比较函数(ACF),建立微波频率与探测功率间的映射,通过映射关系将探测光功率映射为微波频率实现微波

频率测量。功率信号易于检测,完成一次微波频率测量的周期只与光路传输延迟相关,因此功率映射型微波光子学频率测量技术的特点是测量速度快,也被称为瞬时频率测量技术。根据检测功率信号的类型不同,功率映射型微波光子学频率测量技术可

以分为微波功率-频率映射^[13-29]和光功率频率^[30-47]映射。

对于微波功率-频率映射测频方案,通常利用色散介质产生功率衰减曲线,将两条不同趋势的衰减曲线的比值作为 ACF 曲线。2006 年,Nguyen 等^[13]利用双波长光源和色散介质构建 ACF 曲线,如图 5 所示,待

测微波通过载波抑制双边带调制技术加载在光载波上,使用 MZM 加载待测微波,产生的光调制边带经过长距离色散光纤后发生光功率衰落。双波长光源相应产生两条功率衰减曲线,二者相比获得 ACF 曲线用于探测功率映射实现微波频率测量,测频范围覆盖 4~12 GHz,测频精度为 100 MHz。

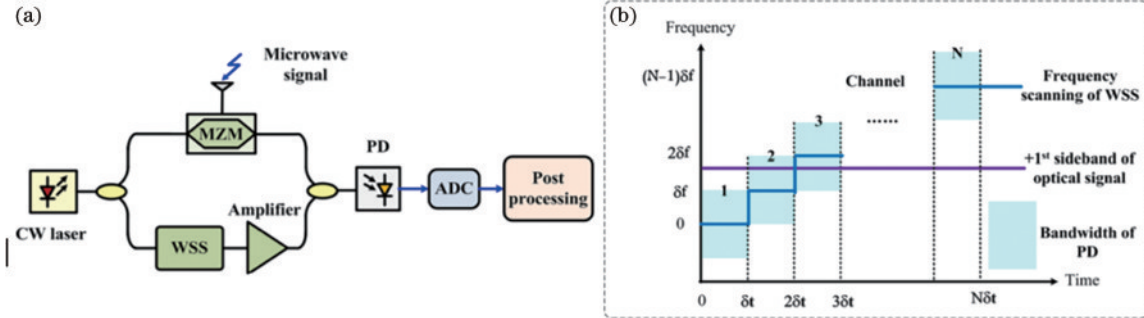


图 5 基于微波功率-频率映射的微波光子测频^[13]。(a)实验装置;(b)功率衰减曲线和幅值比较函数

Fig. 5 Photonic microwave frequency measurement based on microwave power-frequency mapping^[13]. (a) Experimental setup; (b) power fading curve and ACF

后来,通过优化调制技术实现了测频范围和测频精度的提升。使用双电极双输出 MZM^[14-15]、双并行 MZM^[16-17]、双驱动双偏振 MZM^[18-19]等作为调制器件,实现了测频范围的可调谐。另外,利用相位调制器受直流偏置电压影响小的特点^[20],实现系统稳定性增强,提高测频精度。比如将相位调制器与保偏、色散补偿光纤结合,在 10.5 GHz 测频范围内将测频精度提升至 ± 0.07 GHz^[21];或者将相位调制器与偏振控制结合^[22],将测频范围扩展至 1.6~24.6 GHz,测频精度提升至 ± 0.3 GHz;或者同时使用强度型和相位型两种调制方式,在无需调谐情况下实现测频范围扩展和测频精度提升,结合使用偏振调制器与光学偏振器^[23-24],或直接结合使用相位、强度调制器^[25],测频范围扩展至 17 GHz,测频精度提升至 ± 0.2 GHz。

此外,还可以通过优化色散介质选型提升测频范围和测频精度指标。2010 年,Pan 等^[26]利用两段保偏光纤代替普通色散光纤结合偏振调制器,产生低通、带通微波光子互补滤波构建 ACF 曲线,使测频范围扩展到 36 GHz,测频精度优于 0.2 GHz,另外还结合色散损耗消除机制^[27],进一步实现远程微波测频功能。2011 年,Xu 等^[28]利用相位调制器时延产生的传输响应

与相干探测结合构建 ACF 曲线,测频范围覆盖 3.5~10 GHz,测频精度小于 0.2 GHz,而且相位调制器时延的可调节特性使得系统具有可调谐的测量范围。此外,片上波导结构也被用于产生微波衰减曲线,2015 年,Liu 等^[29]利用高 Q 值硅基微盘谐振腔的微波衰减特性构建 ACF 曲线,测频范围覆盖 10 GHz,测频精度为 ± 0.1 GHz。

微波功率-频率映射测频方案的装置简单,容易实现,但是探测高频调制边带光功率信号需要使用大带宽的光电探测器,这将增加系统硬件需求和成本。而光功率-频率映射测频方案通过使用光学混频装置^[30-36]或光学滤波器^[37-47],将输出信号转换为直流或低重复频率的光功率信号,能够有效优化光电探测器带宽需求。

2008 年,Sarkhosh 等^[30]通过级联 MZM 实现光学混频,如图 6 所示,待测微波被等分为两路分别加载在级联的两个 MZM 上,通过二者之间的传输光路产生固定时延实现光学混频,从而产生光功率-频率响应构建 ACF 曲线,由低带宽光电探测器探测光功率后映射得到微波频率,测频范围受限于光路时延只覆盖 2.2~3 GHz。同年,Emami 等^[31]利用不同波长的 3 组光源和 FBG 滤波器降低级联 MZM 间的传输时延,将测频范

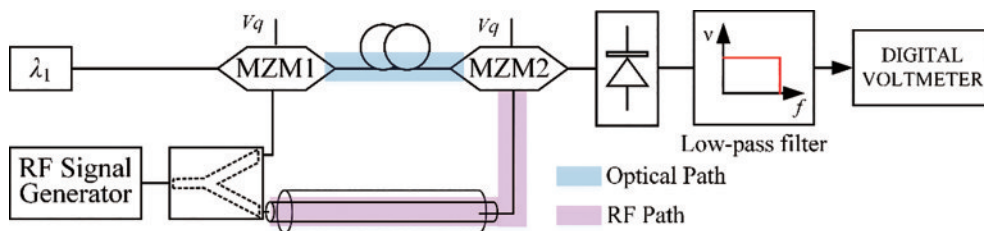


图 6 基于级联 MZM 的光学混频微波光子测频^[30]

Fig. 6 Microwave photonics frequency measurement based on optical mixing unit implemented two cascaded MZMs^[30]

围扩展至 10 GHz。

2009 年, Bui 等^[32]利用高非线性光纤实现光学混频, 如图 7 所示, 通过检测四波混频效应中的闲置分量, 得到光功率-频率响应构建 ACF 曲线, 分段测频范围综合覆盖 1~40 GHz。在此基础上, 通过增加光源

数量实现并行子系统^[33], 利用级联 FBG 滤波器^[34]或色散介质^[35]替代波分复用模块, 简化系统并降低成本。2015 年, Pagani 等^[36]利用硅波导代替高非线性光纤, 提升克尔非线性效应利用率, 在 7.2 GHz 瞬时带宽内, 测频精度被提升至~40 MHz。

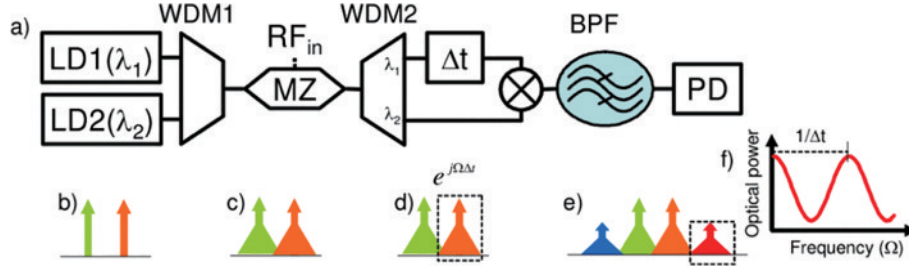


图 7 基于高非线性光纤的光学混频微波光子测频^[32]

Fig. 7 Microwave photonics frequency measurement based on optical mixing unit implemented highly nonlinear fiber^[32]

2008 年, Chi 等^[37]利用双波长光源和光学滤波器实现光功率-频率映射, 图 8(a)为实验装置。图 8(b)中, 光源双波长分别对应光学滤波器光谱响应峰值和谷值, 由光

源经过滤波器后的光谱响应之比构建 ACF 曲线。使用直流 PD 测量光学滤波器输出功率, 大大降低探测器带宽需求, 测频范围覆盖 0~20 GHz, 测频精度为 ± 0.2 GHz。

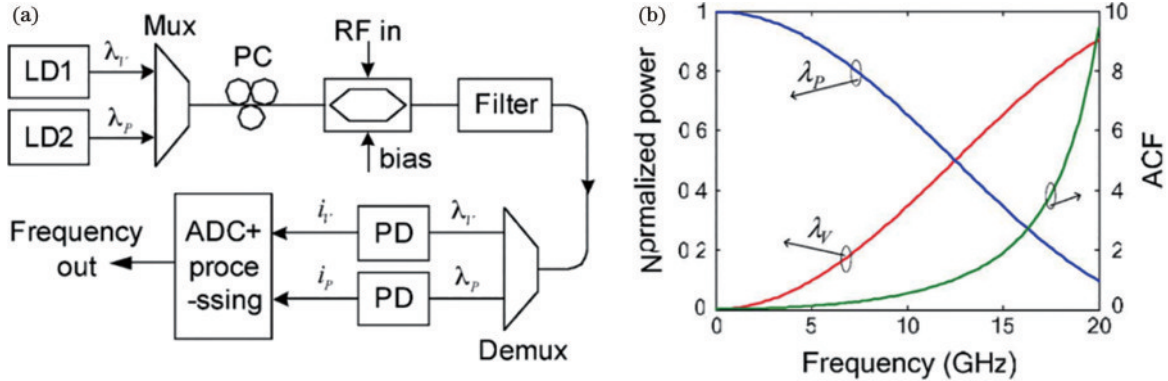


图 8 基于双光源-单滤波器的光功率-频率映射微波光子频率测量^[37]。(a) 实验装置; (b) 滤波器响应和幅值比较函数

Fig. 8 Photonics microwave frequency measurement based on optical power-frequency mapping implementing by dual-sources and single filter^[37]. (a) Experimental setup; (b) filter responses and ACF

2009 年, Zou 等^[38]利用单光源结合互补响应滤波器对双光源系统进行了简化, 图 9(a)为实验装置。图 9(b)中, 互补滤波器的光谱响应峰值和谷值分别与光源波长对应, 利用互补光谱响应比值构建 ACF 曲线, 分别探测两个光学滤波器的输出光功率映射得到

微波频率, 方案的测频范围覆盖 2~24 GHz, 测频精度为 ± 0.2 GHz。2011 年, Zou 等^[39]对该方案进一步优化, 将滤波器 3 dB 响应波长与光源波长对应, 结合单边带调制技术将测频范围扩展至 20~36 GHz, 测频精度为 ± 0.4 GHz。2013 年, Lu 等^[40]使用低带宽交流探

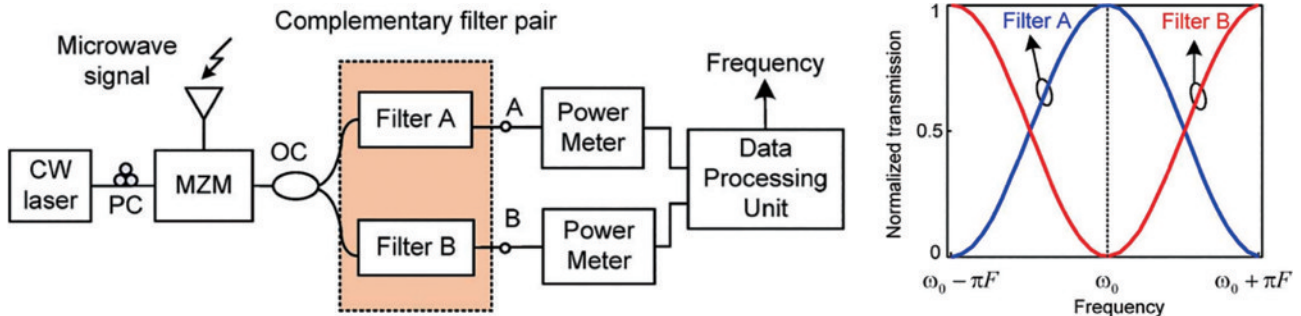


图 9 基于单光源-互补滤波器对的光功率-频率映射微波光子频率测量^[38]。(a) 实验装置; (b) 滤波器互补光谱响应

Fig. 9 Photonics microwave frequency measurement based on optical power-frequency mapping implementing by single source and complementary filters pair^[38]. (a) Experimental setup; (b) transmission responses of the complementary filter pair

测器代替直流探测器并结合直、交流检测电路,实现微波测量的同时进一步实现连续、脉冲微波信号分离。

2010年, Li等^[41]利用单个FBG的透射和反射光谱代替互补滤波器构建ACF曲线,进一步简化系统,图10(a)为实验装置,图10(b)为FBG滤波器的透射

光谱响应和反射光谱响应以及二者之比所构成的ACF曲线,测频范围覆盖1~10 GHz,测频精度为±0.2 GHz。2011年, Li等^[42]通过优化FBG光谱响应构建线性ACF曲线,使测量精度不受ACF曲线斜率影响。

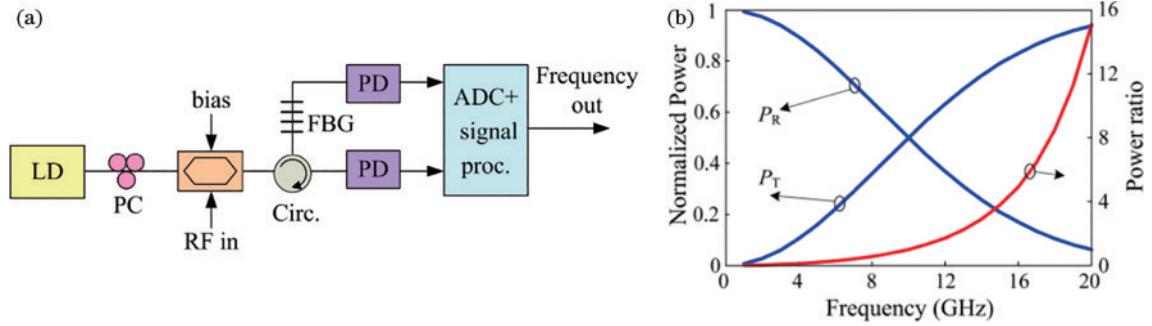


图10 基于单光源-FBG滤波器对的光功率-频率映射微波光子频率测量^[41]。(a) 实验装置;(b) 反射透射输出功率和幅值比较函数
Fig. 10 Photonic microwave frequency measurement based on optical power-frequency mapping implementing by single source and FBG filter^[41]. (a) Experimental setup;(b) reflection and transmission output power and ACF

然而,上述方案中所使用的色散光纤、光学混频单元或光学滤波器产生较长光程,导致微秒至毫秒量级的系统传输延迟,进而导致系统动态响应的的时间分辨率较低。针对这一问题为了降低系统传输延迟,片上集成器件被引入功率映射微波光子测频技术中。2016年, Burla等^[43]利用硅基布拉格光栅的反射和透射光谱响应构建ACF曲线,实现了宽谱高时间分辨率动态微波频率测量,如图11所示,长度为65 mm的硅基布拉格光栅延迟传输低至3.3 ns,该方案的测频范围覆盖30 GHz,测量精度约为700 MHz。在后续研究中,微环谐振腔^[44-45]、硅上集成光学谐振环^[46]、少模光纤^[47]等都被用作功率映射微波光子测频方案中的片上光学滤波器。

影响,测频范围由信道总和决定。根据信道划分方法,信道型微波光子学频率测量技术被分为空分复用^[48]、频分复用^[49-54]和时分复用^[55-59]。

空分复用信道是指利用空间色散器件将频谱在空间域展开,实现信道划分,通过探测器阵列对分散在不同空间位置的信道独立并行探测。2001年, Wang等^[48]利用自由空间衍射光栅实现空分复用信道,如图12所示,单频载波加载待测微波后入射衍射光栅,不同频率的调制边带经过衍射后产生不同角度的衍射角,从而在空间域实现频谱分离,空分信道输出由探测器阵列接收探测,最终由探测器阵列空间位置(对应信道波段)和探测器输出信号共同得到待测微波频率。测频范围由自由空间衍射光栅的自由光谱范围决定,覆盖100 GHz,信道受限于衍射光栅分辨率,系统频率分辨率在1 GHz。

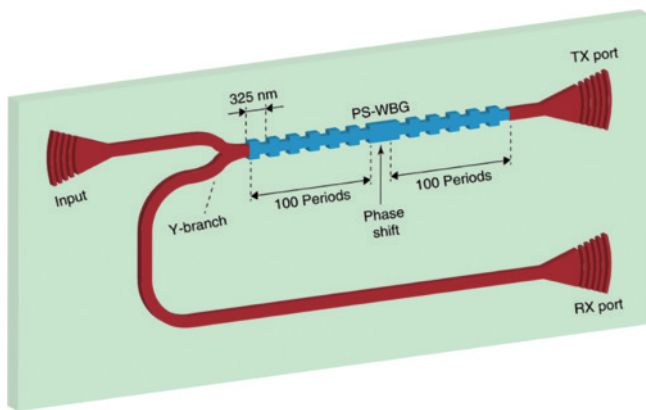


图11 基于硅基布拉格光栅的宽谱动态微波频率识别^[43]
Fig. 11 Wide spectrum dynamic microwave frequency recognition based on silicon Bragg grating^[43]

2.3 信道

信道型微波光子学频率测量技术指的是通过划分窄带子频段,在每个频段内实现高精度测频。窄带子频段被称为信道,测频精度和频率分辨率受信道宽度

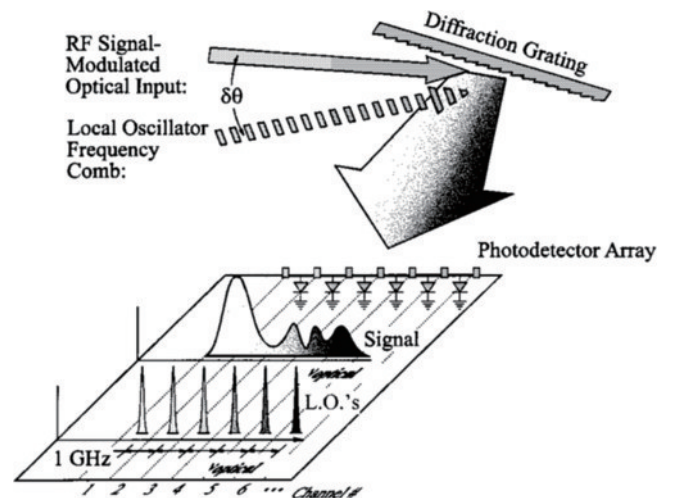


图12 基于自由空间衍射光栅的空分复用信道^[48]
Fig. 12 Space division multiplexing microwave channelization based on free space diffraction grating^[48]

频分复用信道是指利用光学滤波器划分频域信道,光调制边带经过光学滤波器后在频谱上分离,经过解波分复用后利用探测器阵列对频分信道独立探测。2010年,Zou等^[49]利用级联标准具实现频分复用信道,如图13所示,宽谱光源经过标准具I后被频域分割,产生的频谱切割非相干源作为载波加载待测微波,再经过标准具II实现频谱分离,经过解波分复用后利用探测器阵列对频分信道独立探测,最终由信道频段和探测器输出信号共同解调微波频率,测频范围由标准具I的自由光谱范围决定,能够覆盖0~100 GHz,信道宽度受两标准具的自由光谱范围之差影响,频率分

辨率为±2.5 GHz。2012年,Li等^[50]通过光频梳(OFC)对该方案进一步简化,利用OFC代替频谱切割非相干源加载微波,经过标准具II和解波分复用后划分频分信道。OFC的频谱间隔均匀易于调谐,能够获得更高信噪比的频分信道,测频范围覆盖0.5~11.5GHz,频率分辨率为±0.5 GHz。2012年,Xie等^[51]将OFC作为载波,使用FP滤波器代替标准具II来简化光谱对准过程,测频范围覆盖8~13 GHz,频率分辨率为1 GHz。2013年,Wang等^[52]进一步引入偏振分集技术提高系统信噪比,将频率分辨率提升至0.5 GHz。

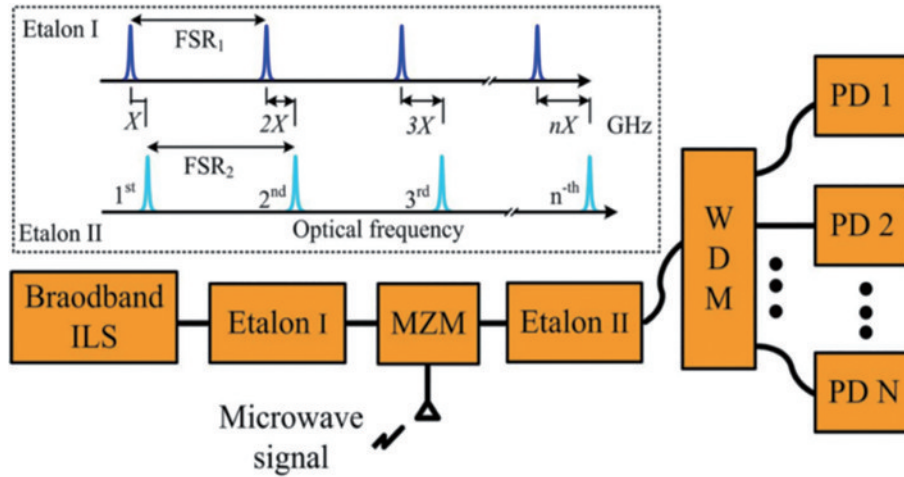


图 13 基于级联标准具的频分复用信道^[49]

Fig. 13 Frequency division multiplexing microwave channelization based on spectrum slicing incoherent source^[49]

频率分辨率受限于标准具或滤波器的频谱响应宽度,2012年,Xie等^[53]通过IQ解调技术压窄信道宽度优化了系统频率分辨率,两束OFC分别作为载波和本振,经解波分复用后载波与本振拍频并利用低带宽探测器阵列独立、并行探测频分信道,频率分辨率提升至500 MHz,测频范围覆盖3.75~7.25 GHz。2013年,Zou等^[54]利用SBS效应中的布里渊频谱作为窄线宽光

学滤波器进一步提升频率分辨率,如图14所示,由光源阵列组成的多波长光源被分为两束,一束作为加载待测微波,另一束经过固定移频和频谱整形,二者相向入射光纤发生SBS效应,不同波长产生的布里渊增益谱在频域构成信道,当加载微波后的光调制边带落在由布里渊频谱组成的信道内时,光功率将被增益,经解波分复用后由探测器阵列对各信道(不同波长)的输出

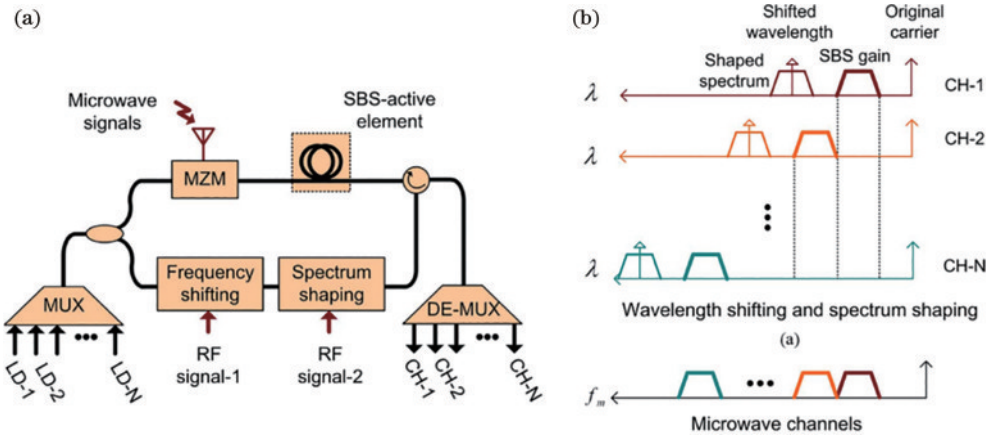


图 14 基于SBS效应的频分复用信道微波频率测量^[54]。(a) 实验装置;(b) 频分复用信道划分

Fig. 14 Frequency division multiplexing microwave channelization based on SBS effect^[54]. (a) Experimental setup; (b) frequency division multiplexing channelization

信号独立并行探测,光源波长数决定信道个数,波长间隔决定信道间隔,通过调节波长间距可以设置不连续的频分信道,信道宽度通过调节布里渊频谱谱宽和频谱整形调谐,可调谐范围为 40~90 MHz。实际上,受多波长光源阵列的成本和体积影响,信道个数通常只局限于有限个数。

时分复用信道指的是利用可调延迟线或频移循环回路将频谱映射为时隙信号,在时域上分离微波频率,通过测得的时隙间隔映射得到微波频率,因此时分复用信道也被称为频率-时间映射微波光子学频率测量技术。2013 年, Li 等^[55]利用光波长扫描源实

现时分复用信道,如图 15 所示,连续输出光作为光源被分为两束,一束作为载波加载待测微波,另一束由扫描源实现光波长线性扫频,两束光拍频后利用低带宽光电探测器探测,二者频差小于探测器带宽时拍频信号被检出,探测器输出电信号的强度改变时产生时隙信号,根据时隙信号时域位置和扫频光的时-频关系共同得到待测微波频率,信道宽度由扫频步长和探测器带宽决定,测频范围由波长扫描范围决定,测量时间等于完成一轮波长扫描的周期,频率分辨率为 2 MHz,测频范围覆盖 20 GHz,测量时间为 5 μ s。

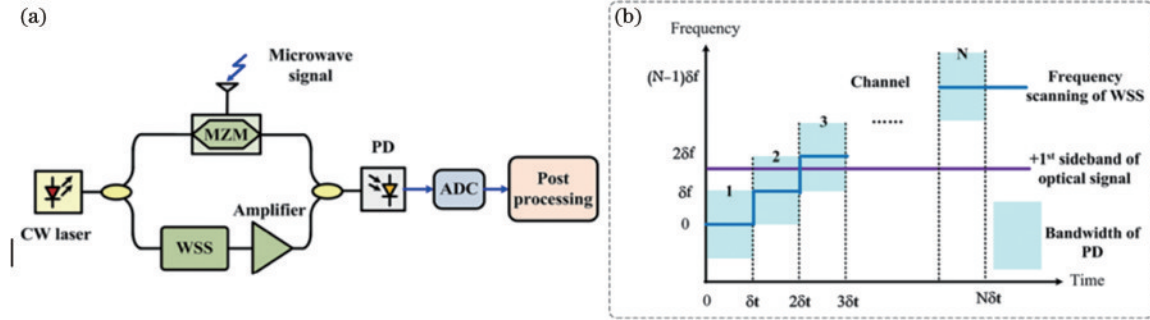


图 15 基于光波长扫描源的时分复用信道微波频率测量^[55]。(a) 实验装置; (b) 时分复用信道划分

Fig. 15 Time division multiplexing microwave channelization based on optical wavelength scanning source^[55]. (a) Experimental setup; (b) time division multiplexing channelization

2014 年, Nguyen 等^[56]利用频移循环回路简化扫频装置,光载波加载待测微波产生调制边带,边带经过频移循环回路发生移频,部分光直接输出,余下的光回到循环回路继续移频,从而无需依赖扫频源装置也能实现阶梯扫频过程,进一步简化了系统,系统测频范围由频移循环回路的光衰减决定,覆盖 0.1~20 GHz,频率分辨率为频移循环回路的单次移频步长,为 250 MHz。同年, Nguyen 等^[57]将频移循环回路与 SBS 效应结合,如图 16 所示,载波加载待测微波

后经频移循环回路发生移频,与泵浦光在光纤中发生 SBS 效应,移频后的探测光频落在布里渊增益谱区内,探测光功率被增益。这里布里渊频谱被用作窄带光学滤波器使用,代替窄带宽探测器探测拍频信号,进一步降低探测器带宽需求,测频范围仍由频移循环回路的光损耗决定,覆盖 0.1~20 GHz,频率分辨率仍由单次移频补偿决定,为 250 MHz,受限于频移循环回路中的延迟光纤,测频时间在秒量级。

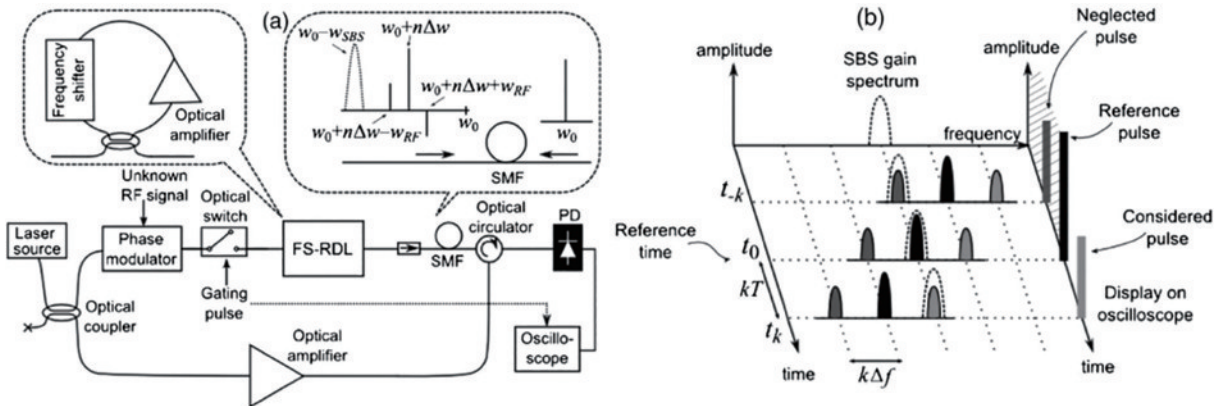


图 16 基于 SBS 和频移循环回路的时分复用信道微波频率测量^[57]。(a) 实验装置; (b) 时分复用信道划分

Fig. 16 Time division multiplexing microwave channelization based on SBS and frequency shifting cyclic delay line^[57]. (a) Experimental setup; (b) time division multiplexing channelization

2021 年, Liu 等^[58]在此基础上利用外调制扫频代替频移循环回路,缩短扫频周期提升测量速度,载波加

载待测微波同时本振光通过外调制扫频,二者在光纤中发生 SBS 效应,扫频光频率落在布里渊频谱内时光

功率发生增益产生时隙信号,实现时间-频率映射,外调制技术将测频时间缩短至 0.1 s,测频范围由外调制器件带宽决定,在实验中测频范围覆盖 6~18 GHz,通过引入参考信号和后处理算法将测频精度提升至 ± 1 MHz。同年,Shi 等^[59]通过叠加 SBS 效应产生的增益谱与损耗谱,压窄布里渊频谱谱宽将频率分辨率提升至 10 MHz,在实验中测频范围覆盖 0.3~7.6 GHz,测量时间为 0.5 s。

2.4 微波光子学频率测量技术研究进展

频分或空分复用信道型微波光子学频率测量技术可以通过增加信道数量、细化信道宽度来提高测频精度,但是光源和探测器需要与信道数量匹配,这将增加系统复杂性和系统体积,因此频分或空分信道技术的发展存在一定局限。

功率映射型微波光子学频率测量技术,其单次测频周期只与光路传输延迟有关,使用光纤作为色散介质的系统传输延迟在 μs 量级,而使用片上器件能够将传输延迟降低至 ns 量级,作为超快微波光子学频率测量技术的一种,其测量速度在现有技术中领先。但是受漂移噪声的影响,其测频精度被限制在百 MHz 量级,并且单调的 ACF 映射关系不具备多频微波测量能力。

频谱分析型和时分信道型微波光子学频率测量技术二者本质上都是利用扫频光结合光学滤波器,将微波加载在扫频光上或通过调制实现滤波器中心频率扫频,最终根据滤波器的输出光谱响应以及扫频光频率值解调微波频率。因此通过细化扫频精细度或压窄滤波器带宽能够提升测频精度,比如将 SBS 增益谱和损耗谱叠加,能够将测频精度提升至 10 MHz。但是,动态测频速度受限于滤波器的动态响应能力,比如以布里渊频谱作为窄带滤波器的时分复用信道,扫频过程中单个频率持续时间需要大于介质声子寿命,保证达到稳态 SBS,输出稳定的布里渊频谱响应,并且扫频范围增大、精细度提高时,单次测频周期将成倍增长,通常时间映射型测频技术单次测频周期被限制在 $\mu\text{s}\sim\text{ms}$ 量级。

因此,现有微波光子学频率测量技术大多针对测频范围、测频精度、测频速度其中一项进行单项技术指标突破。面向时频联合分析应用时,功率映射型测频技术超快的测量速度能够提供高时间分辨率,但测频精度受限;而频谱分析或时分信道型测频技术测频精度高,但是系统响应限制其测频速度,难以提供较高的测频时间分辨率。针对这一现状,提出基于光学啁啾链瞬态受激布里渊散射效应的微波光子学频率测量技术,实现超快测频的同时还能够保证测频精度,同时还具备多频微波测量、可重构综合测频范围等综合能力。

3 基于光学啁啾链瞬态受激布里渊散射的超快微波光子学频率测量技术研究

受激布里渊散射效应中的布里渊频谱可作为窄带

宽滤波器与扫频光结合实现微波光子学频率测量,并且其窄带宽特性有效提高了这些方案的测频精度。但是,这些方案依赖于采集稳态 SBS 条件下的布里渊频谱响应,扫频速度无法进一步提升限制测频速度。基于光学啁啾链(OCC)瞬态 SBS 的超快微波光子学频率测量技术,不再依赖稳态布里渊频谱响应,而是采集 OCC 在光纤中发生瞬态 SBS 效应的结果,直接在时域重构布里渊频谱响应,通过时域信号解调微波频率,因此能够突破布里渊滤波器响应速度对扫频速度的限制,实现超快微波光子学测频。同时布里渊频谱的窄带宽特性依然能够保证测频精度,在时频分析应用中实现高时间分辨率、高精度测频。

3.1 基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波光子学频率测量

OCC 是一种光频周期性超快线性扫频的连续光,具有时域超短周期重构频谱的能力,通常通过外调制技术结合滤波或注入锁定技术实现,在几十纳秒的啁啾周期内,重构带宽能够覆盖几个 GHz。基于 OCC 瞬态 SBS 的超快微波光子学频率测量技术,利用 OCC 在光纤中发生瞬态 SBS 效应在时域重构瞬态布里渊频谱,通过时域信号解调微波频率,时域信号周期决定了单次测频周期,从而实现超快微波光子学频率测量。图 17 为基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波频率测量原理图,微波频率随时间发生变化,连续光作为载波加载待测微波,利用脉冲序列调制实现微波频率时域采样,采样周期等于脉冲周期 T_p 。携带频率信息的脉冲序列与 OCC 相向入射光纤发生瞬态 SBS 效应,直接在时域重构瞬态布里渊谱,通过瞬态谱的主峰位置解调待测微波频率,单次测频周期等于脉冲周期 T_p ,也等于 OCC 重复周期。另外,脉冲光序列与 OCC 连续作用,时域周期性重构的瞬态布里渊谱首尾相连形成时域波形,通过采集时域波形和每个采样周期内的瞬态谱,得到待测微波的时间-频率分布关系,实现高时间分辨率的微波时频分析。

图 18 为基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波频率测量实验装置。在实验中,使用工作波长为 1550 nm 的分布式反馈激光器(DFB)作为光源,光源输出的连续光经 90:10 耦合器被分为两束光,耦合器上路输出用于产生泵浦脉冲序列,耦合器输出的连续光经过声光调制器(EOM1)加载待测微波频率,经过声光调制器(AOM)被调制成脉冲序列,实现待测微波频率的时域采样,采样周期等于脉冲周期。脉冲序列经掺铒光纤放大器(EDFA)进一步放大光强,高功率泵浦脉冲序列经由环形器注入光纤。本方案使用普通单模光纤作为布里渊增益介质,也可以使用定制波导作为增益介质并通过设计优化增益谱宽和增益系数,以获得更高性能的布里渊滤波器,提高测频精度。上路中 EOM1 的控制电压为载波抑制双边带调制工作点。AOM 的调制脉冲序列的电驱动信号由任意函数发生器(AFG)产生。

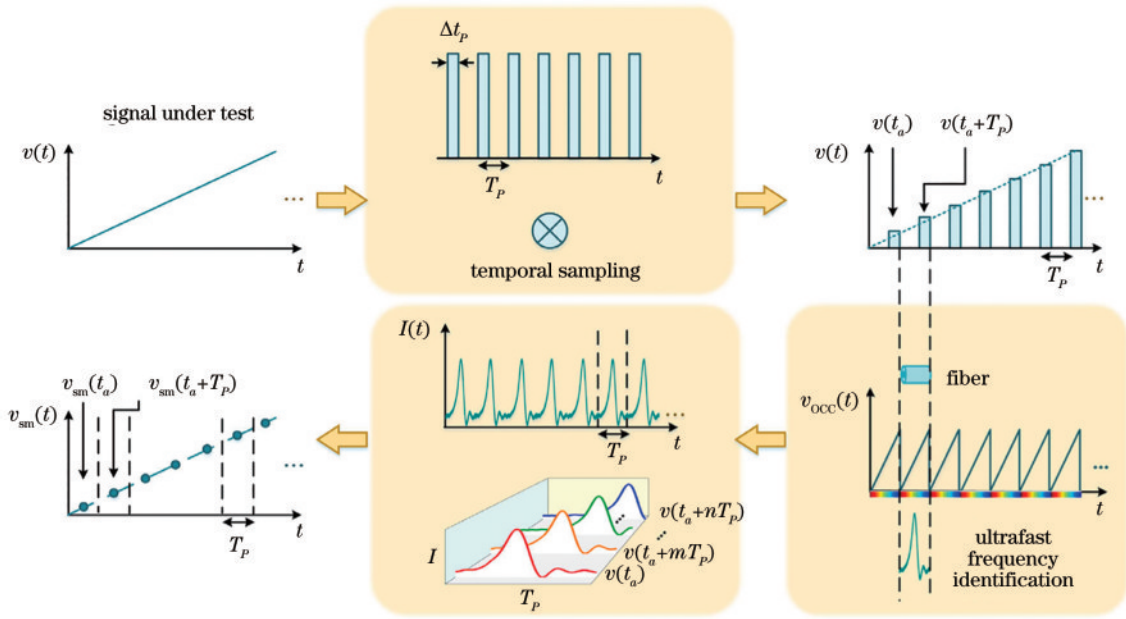


图 17 基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波光子频率测量原理

Fig. 17 Principle of ultrafast microwave photonics frequency measurement based on OCC transient SBS

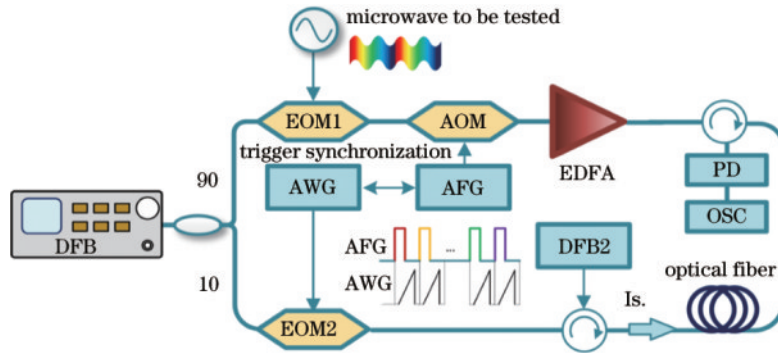


图 18 基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波光子学频率测量实验装置

Fig. 18 Experimental setup of ultrafast microwave photonics frequency measurement scheme based on OCC transient SBS

耦合器下路输出用于产生 OCC 探测光,耦合器输出的连续光经过 EOM2 被调制成载波抑制双边带调制光,利用注入锁定技术产生 OCC。EOM2 输出的载波抑制双边带调制信号作为注入锁定结构中的主激光,经过环形器后注入无内置隔离的 DFB2,DFB2 作为注入锁定从激光器,调节 DFB2 的驱动电流和控制温度,使输出波长与所选边带中心波长对准,实现注入锁定经环形器输出放大,并以单边带作为 OCC 探测光。注入锁定结构的输出光功率只与从激光器的输出光功率有关,因此能够消除调制中的强度噪声、实现光功率放大,保证输出 OCC 的光功率平整度的同时放大了光功率,提升实验光路信噪比,避免了后续光放大器的使用。OCC 探测光由环形器输出后输入光纤,为防止高功率泵浦脉冲序列经过光纤后进入探测路造成器件损坏,使用隔离器对泵浦脉冲进行光隔离。光纤输出信号经环形器输出,由光电探测器(PD)转换为电信号,最终由示波器(OSC)采集。下路中 EOM2 所加载的啁啾调制信号由任意波形发生器(AWG)产生输出。

AFG 和 AWG 的输出由触发信号实现外部同步。光纤被放置在恒温箱中,隔绝外界温度、应变噪声的影响。

3.2 时变频微波频率测量

通过对“三角波”调制和“Costas 编码”调制两种待测微波进行动态频率测量,对方案的时频分析时间分辨率进行验证。图 19 为对两种时变频微波的测量结果。待测微波频率以 100 ns 为步进快速切换,三维图中瞬态谱的主峰能够清晰描绘出待测微波频率随时间变化的形貌,并能够分辨出 100 ns 的频率步进时长。由瞬态谱解调得到微波频率并按时间顺序排列,复原得到待测微波的时间-频率关系,与输入微波信号对比,测频方案能够在 100 ns 内完成单次频率测量并且能够准确测得微波频率值,对时间-频率分布的复原具有一致性。

此外,测频方案对于多频微波也具备高时间分辨率测频能力。多频微波是指接收到的微波信号在同一时刻包含多个频率成分,是雷达技术中常见的微波信

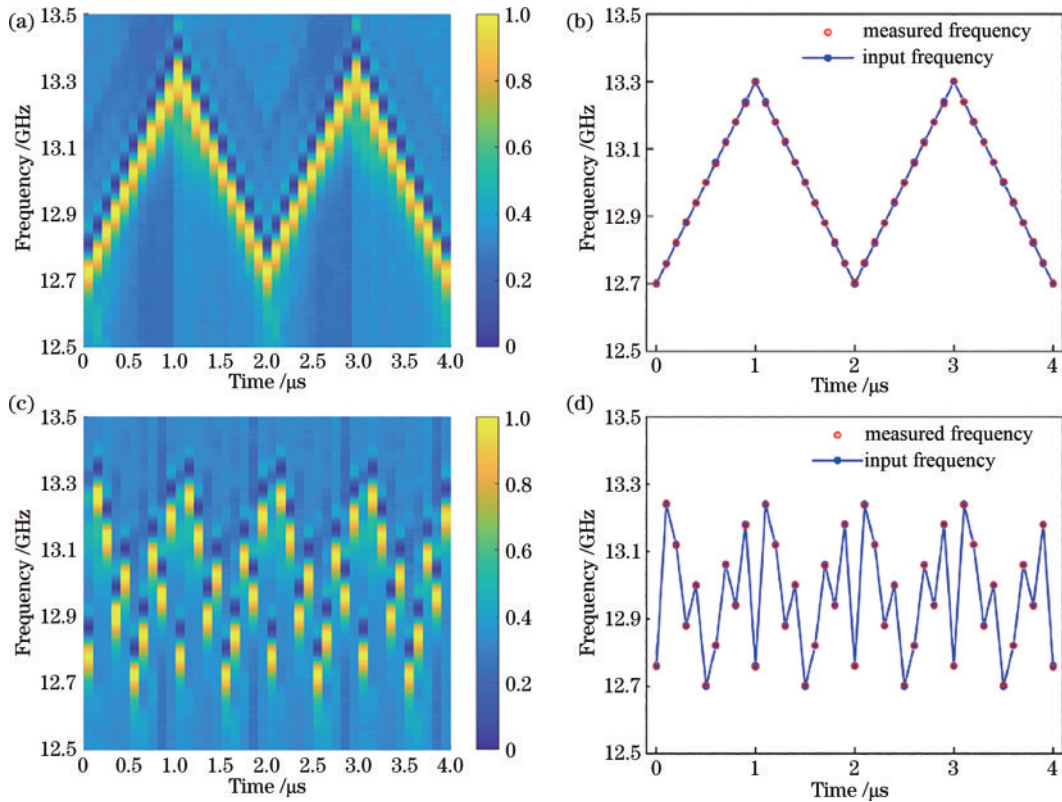


图 19 单频时变频微波超快测频结果。(a) 三角波调制微波;(b) 三角波调制微波解调结果;(c) Costas 编码微波;(d) Costas 编码微波解调结果

Fig. 19 Ultrafast frequency measurement results of microwave with single component. (a) Triangular frequency modulated microwave; (b) demodulation results of triangular microwave; (c) Costas code frequency modulated microwave; (d) demodulation results of Costas code frequency modulated microwave

号形式。基于功率映射的微波光子测频技术具备超快测频能力,但单调的幅值比较函数曲线难以映射多频微波频率,因此对于多频微波的超快微波频率测量也具有深远应用价值。

当待测微波为多频微波信号时,OCC瞬态SBS效应在时域重构包含多峰的瞬态布里渊谱,解调瞬态谱的多峰得到微波频率成分。通过对“三角波-单频”调制和“双三角波”调制两种微波进行动态频率测量,对方案的多频测量能力进行了验证,待测微波频率仍以100 ns为步进快速切换。图20为对两种多频微波的测量结果,三维图中瞬态谱包含双峰,两个主峰清晰描绘出待测微波内双频成分随时间变化的形貌。通过解调多峰瞬态谱每个峰值对应的频率并按时序排列,复原得到两种多频微波的时间-频率关系。与输入的待测微波对比,测频方案能够在100 ns内完成单次频率测量,而且还能准确区分并测量多频微波的频率成分。

3.3 高精度微波频率解调

在功率映射型测频技术中,测频的瞬时带宽由构建ACF曲线的色散介质或滤波器光谱响应决定,因此扩展或重构瞬时带宽需要更换系统元器件。而基于OCC瞬态SBS效应的微波光子测频技术,通过提高

OCC啁啾速率能够直接扩展瞬时带宽,同时不会对测频速度造成影响。但是,OCC啁啾速率提升会导致瞬态效应的增加,加剧瞬态光谱不对称,通过传统拟合方法解调瞬态光谱中心频率将会引入解调误差,影响测频精度。神经网络(ANN)作为一种自适应模型,能够通过训练和学习解决复杂的非线性映射关系。因此通过图像处理和ANN优化瞬态谱解调算法,能够提高微波频率解调精度和效率,提升基于OCC瞬态SBS效应的超快微波光子测频技术的频率解调精度。

图21为基于图像处理和ANN的瞬态谱解调算法流程图。在开始神经网络训练前,首先对作为训练样本的瞬态布里渊光谱进行两步预处理,包括图像分割和主成分分析(PCA)。图像分割算法用来提取只包含瞬态谱主峰的信息,实现数据降噪;PCA对降噪后的数据进行降维,降低神经网络的运算复杂度。将由PCA降维后的特征向量矩阵输入神经网络训练,以与之对应的理论微波频率值作为训练目标。训练得到的神经网络具有一定的适用性,即输入数据维度需要与神经网络的输入维度即PCA压缩后的数据维度保持一致,因此实测数据输入神经网络解调微波频率前,也要遵循如图21所示流程进行两步数据预处理,再输入神经网络中解调。

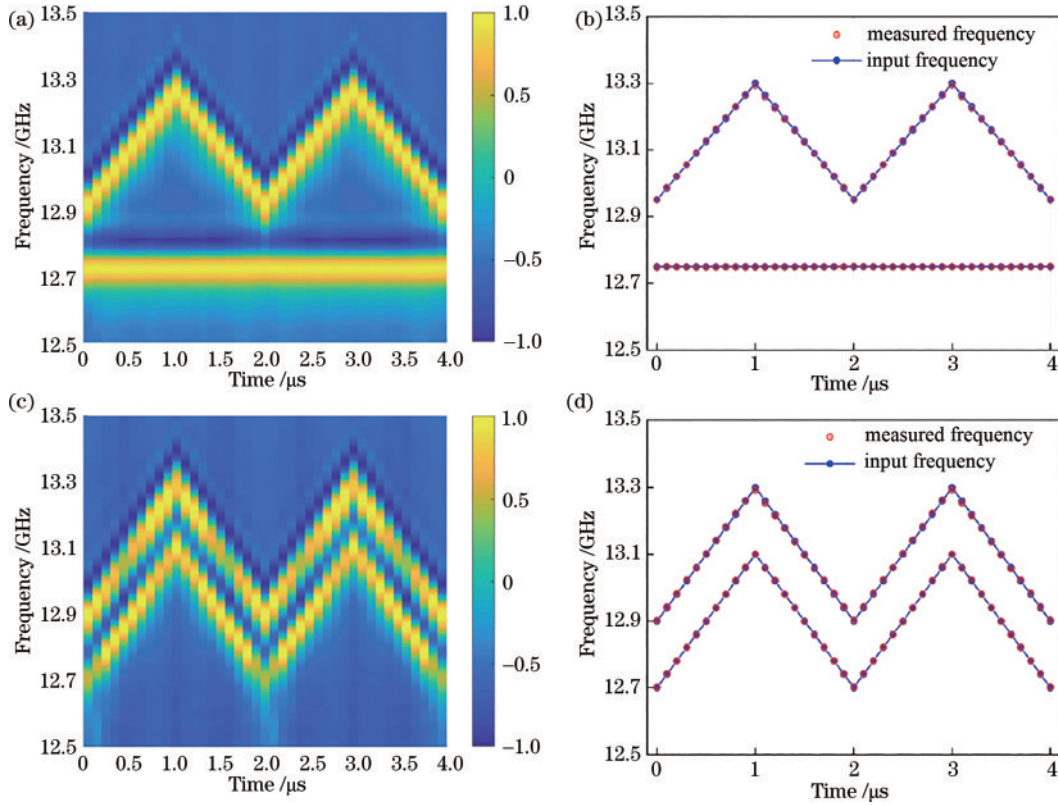


图 20 多频时变频微波超快测频结果。(a) 三角波-单频调制微波;(b) 三角波-单频调制微波解调结果;(c) 双三角波调制微波;(d) 双三角波调制微波解调结果

Fig. 20 Ultrafast frequency measurement results of microwave with multiple components. (a) Triangular-single frequency modulated microwave; (b) demodulation results of triangular-single microwave; (c) double triangular frequency modulated microwave; (d) demodulation results of double triangular frequency modulated microwave

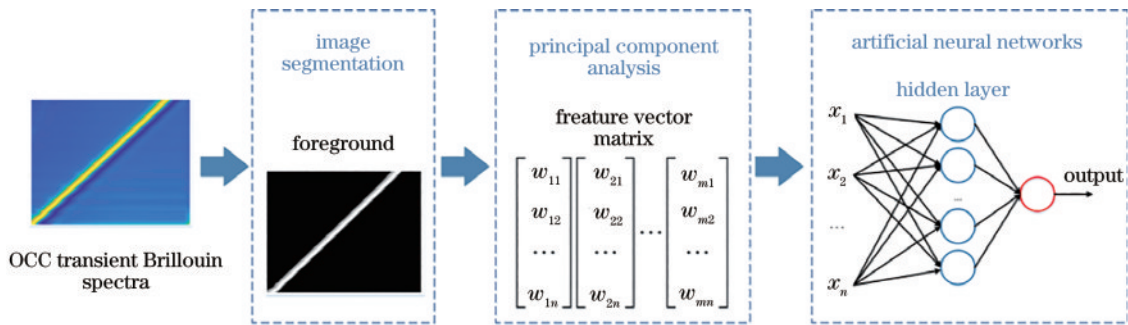


图 21 基于图像处理和人工神经网络的解调算法流程图

Fig. 21 Flow chart of demodulation algorithm based on image processing and artificial neural network

在训练得到神经网络后,对实测瞬态谱进行解调,并以二项式拟合法作为对比,分析方案的频率解调精度。待测微波为线性调频微波,微波频率在 12.14~15.34 GHz 之间以 100 MHz 为频率步进线性变化, OCC 啁啾周期被提升至 50 MHz/ns,时间分辨率保持 100 ns 不变,瞬时带宽被扩展到 4 GHz。图 22(a)为按输入频率顺序排列的实测瞬态谱,底部横坐标表示时域瞬态谱的时间,顶部横坐标表示频域瞬态谱的频率,二者可以根据 OCC 参数相互转换,纵坐标表示输入微波频率,色度条表示瞬态谱的归一化强度。从图中可知,在高啁啾速率下瞬态谱的主峰位置仍然能够清晰描绘

出线性调频微波频率的变化形貌。图 22(b)为两种解调算法对实测瞬态谱的解调结果,横坐标为微波输入频率,纵坐标为测频的绝对误差,用测量得到的微波频率与输入频率的差值表示。蓝色点线表示二项式拟合的解调结果,解调实测谱的最大绝对误差为 15.04 MHz,红色点线表示 ANN 的解调结果,最大绝对误差为 2.62 MHz,对比二项式拟合,所提解调算法将绝对误差大大降低。测频精度由多次测量的绝对误差之间的均方根误差定义,二项式拟合对 33 个频率解调的均方根误差为 9.85 MHz,而所提解调算法对 33 个频率解调的均方根误差为 1.17 MHz,将测频精度提升了约 8.42 倍。

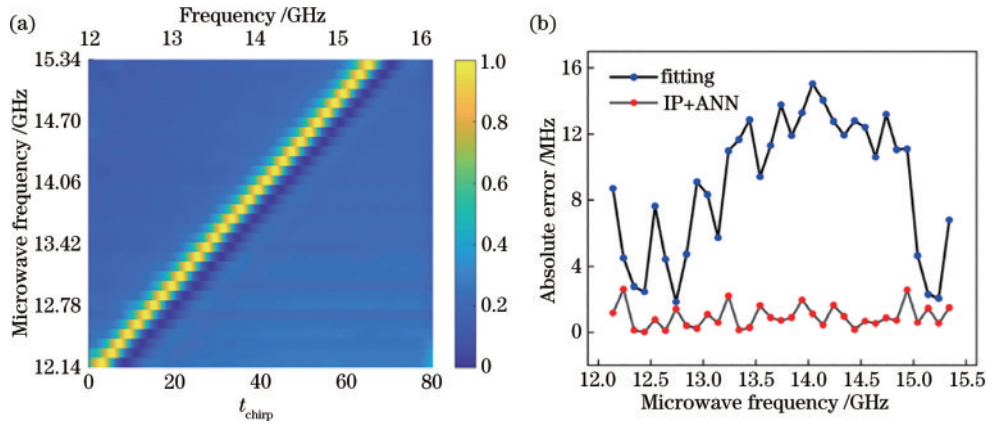


图 22 待解调信号和解调结果。(a) 待解调的实测瞬态谱;(b) 两种解调算法对实测瞬态谱的解调结果
 Fig. 22 Signals to be demodulated and demodulation results. (a) The measured transient spectrum to be demodulated;
 (b) demodulation results of two demodulation algorithms

3.4 可重构

通过对 OCC 的参数编程还能够在不更换系统元件的前提下重构瞬时测频范围。在实验中,根据 SBS 效应的增益谱和损耗谱结构,通过改变 OCC 的啁啾速率和扫频范围实现了 4 种测频条件,综合测频范围覆

盖 0~20 GHz。图 23 为可重构瞬时带宽和测频范围实验结果,横坐标表示 OCC 啁啾周期内的时间,纵坐标表示输入微波频率,色度条表示瞬态布里渊谱的归一化强度。因此,基于 OCC 瞬态 SBS 效应的微波光子测频方案的综合测频能力覆盖 20 GHz。

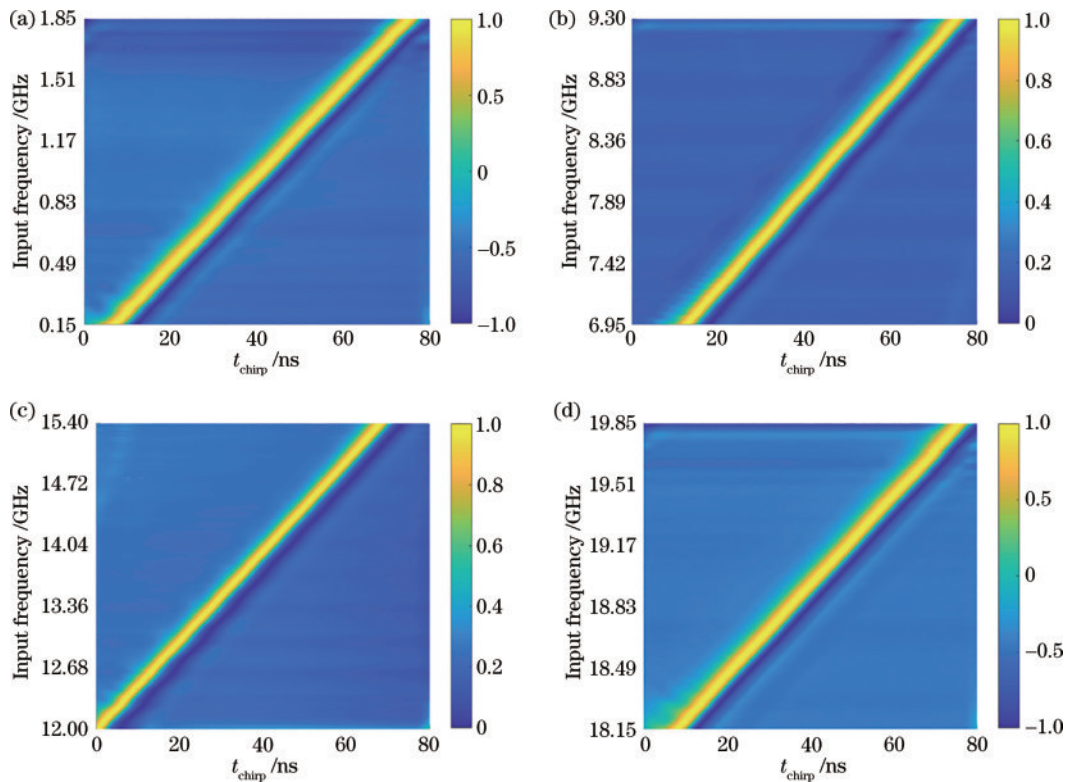


图 23 可重构瞬时带宽和测频范围实验结果。(a)~(d)测量范围分别为 0.15~1.85 GHz、6.95~9.3 GHz、12~15.4 GHz、18.15~19.85 GHz

Fig. 23 Reconfigurable instantaneous bandwidth and frequency range. (a)~(d) Measurement range of 0.15~1.85 GHz, 6.95~9.3 GHz, 12~15.4 GHz, 18.15~19.85 GHz

4 结束语

超快微波光子学频率测量技术作为频谱分析前沿技术之一,具有高带宽、低传输损耗、抗电磁干扰等不

可替代的优势,而且在时频联合分析中具有更高的时间分辨率,在航空航天、雷达等领域,以及电磁空间安全管理与防护领域展现出独特的技术优势和初步应用。按照技术类型详细介绍了现有微波光子学频率测

量技术,并围绕关键技术指标进行了对比。针对超快测频无法兼具高精度的特点,论述了基于 OCC 瞬态 SBS 效应的超快微波光子学频率测量技术,其兼具 100 ns 超快单次测频周期和 1 MHz 测频精度,同时具备多频分辨、可重构等综合性能。在未来,微波光子学在超快频率测量技术领域的应用值得更进一步的研究,发展趋势包括:

1) 进一步向高集成度的片上微波光子测频拓展:目前对于高集成度的片上微波光子测频技术正处于初级阶段,将现有基于 OCC 技术的微波光子测频方案与片上光学平台结合,能有效缩小实验系统体积,在频谱动态分析等在线微波测量场景中具有广阔的应用前景,相关工作值得进一步完善。

2) 进一步向高灵敏度的测频系统拓展:现有微波光子测频方案通常需要经过反复电-光、光-电转换完成信号处理和传递,但转换过程中的插入损耗将对系统灵敏度造成影响,目前增强微波测频系统灵敏度最直接的手段是对前端微波放大系统进行优化,提高放大质量和信噪比。因此对高灵敏度微波光子频率测量技术的研究工作值得进一步完善。

3) 进一步向全光化系统发展:对于现有微波光子测频方案,不同微波光子处理单元、测量系统之间的微波接口导致的带宽制约,影响了光学处理在超宽带方面的优势发挥。因此全流程光处理的全光化系统将能进一步完善微波光子测量技术,提升系统关键性能,相关工作值得进一步完善。

参 考 文 献

- [1] Winnall S T, Lindsay A C. A Fabry-Perot scanning receiver for microwave signal processing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7): 1385-1390.
- [2] Pelusi M, Luan F, Vo T D, et al. Photonic-chip-based radio-frequency spectrum analyser with terahertz bandwidth[J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 139-143.
- [3] Guo H L, Xiao G Z, Mrad N, et al. Measurement of microwave frequency using a monolithically integrated scannable echelle diffractive grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(1): 45-47.
- [4] Rugeland P, Yu Z, Sterner C, et al. Photonic scanning receiver using an electrically tuned fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 3794-3796.
- [5] Zheng S L, Ge S X, Zhang X M, et al. High-resolution multiple microwave frequency measurement based on stimulated Brillouin scattering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1115-1117.
- [6] Long X, Zou W W, Chen J P. Broadband instantaneous frequency measurement based on stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2206-2214.
- [7] Mian A L, Haxha S, Flint I. Tuneable microwave photonics filter based on stimulated Brillouin scattering with enhanced gain and bandwidth control[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(2): 423-431.
- [8] Preußler S, Wiatrek A, Jamshidi K, et al. Brillouin scattering gain bandwidth reduction down to 3.4 MHz[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8565-8570.
- [9] Preussler S, Schneider T. Attometer resolution spectral analysis based on polarization pulling assisted Brillouin scattering merged with heterodyne detection[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26879-26887.
- [10] Preussler S, Schneider T. Stimulated Brillouin scattering gain bandwidth reduction and applications in microwave photonics and optical signal processing[J]. Optical Engineering, 2016, 55(3): 031110.
- [11] Jiang H Y, Marpaung D, Pagani M, et al. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter[J]. Optica, 2016, 3(1): 30-34.
- [12] Pan S L, Xue M, Qing T, et al. Ultra-high resolution optical vector analysis[J]. Optoelectronic Technology, 2017, 37(3): 147.
潘时龙, 薛敏, 卿婷, 等. 超高分辨率光矢量分析技术[J]. 光电子技术, 2017, 37(3): 147.
- [13] Nguyen L V T, Hunter D B. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10): 1188-1190.
- [14] Zou X H, Yao J P. An optical approach to microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(23): 1989-1991.
- [15] Li J Q, Fu S N, Xu K, et al. Photonic-assisted microwave frequency measurement with higher resolution and tunable range[J]. Optics Letters, 2009, 34(6): 743-745.
- [16] Li W, Zhu N H, Wang L X. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 427-436.
- [17] Zhang H L, Pan S L. High resolution microwave frequency measurement using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(11): 623-625.
- [18] Yang C W, Yu W Q, Liu J G. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on a polarization multiplexing modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 5500611.
- [19] Fu S N, Zhou J Q, Shum P P, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using programmable differential group delay (DGD) modules[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(6): 967-973.
- [20] Zhang X M, Chi H, Zhang X M, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(6): 422-424.
- [21] Zhou J Q, Fu S N, Shum P P, et al. Photonic measurement of microwave frequency based on phase modulation[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7217-7221.
- [22] Tu Z Y, Wen A J, Gao Y S, et al. A photonic technique for instantaneous microwave frequency measurement

- utilizing a phase modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(24): 2795-2798.
- [23] Zou X H, Pan S L, Yao J P. Instantaneous microwave frequency measurement with improved measurement range and resolution based on simultaneous phase modulation and intensity modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(23): 5314-5320.
- [24] Li J, Ning T G, Pei L, et al. Performance analysis on an instantaneous microwave frequency measurement with tunable range and resolution based on a single laser source [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 54-61.
- [25] Zhou J Q, Fu S N, Aditya S, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using photonic technique [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(15): 1069-1071.
- [26] Pan S L, Yao J P. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter pair[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(19): 1437-1439.
- [27] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Dispersion-induced-loss-independent photonic instantaneous frequency measurement using remote-fiber-based tunable microwave filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(15): 1090-1092.
- [28] Xu K, Dai J, Duan R M, et al. Instantaneous microwave frequency measurement based on phase-modulated links with interferometric detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(18): 1328-1330.
- [29] Liu L, Jiang F, Yan S Q, et al. Photonic measurement of microwave frequency using a silicon microdisk resonator[J]. *Optics Communications*, 2015, 335: 266-270.
- [30] Sarkhosh N, Emami H, Bui L, et al. Reduced cost photonic instantaneous frequency measurement system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(18): 1521-1523.
- [31] Emami H, Sarkhosh N, Bui L, et al. Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13707-13712.
- [32] Bui L, Pelusi M D, Vo T D, et al. Instantaneous frequency measurement system using optical mixing in highly nonlinear fiber[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22983-22991.
- [33] Bui L, Sarkhosh N, Mitchell A. Photonic instantaneous frequency measurement: parallel simultaneous implementations in a single highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(5): 915-925.
- [34] Bui L, Mitchell A. Amplitude independent instantaneous frequency measurement using all optical technique[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29601-29611.
- [35] Emami H, Ashourian M. Improved dynamic range microwave photonic instantaneous frequency measurement based on four-wave mixing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(10): 2462-2470.
- [36] Pagani M, Morrison B, Zhang Y B, et al. Low-error and broadband microwave frequency measurement in a silicon chip[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 751-756.
- [37] Chi H, Zou X H, Yao J P. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(14): 1249-1251.
- [38] Zou X H, Chi H, Yao J P. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(2): 505-511.
- [39] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Photonic instantaneous frequency measurement using a single laser source and two quadrature optical filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(1): 39-41.
- [40] Lu B, Pan W, Zou X H, et al. Photonic frequency measurement and signal separation for pulsed/CW microwave signals[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(5): 500-503.
- [41] Li Z, Yang B, Chi H, et al. Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(3): 396-399.
- [42] Li Z, Wang C, Li M, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2011, 21(1): 52-54.
- [43] Burla M, Wang X, Li M, et al. Wideband dynamic microwave frequency identification system using a low-power ultracompact silicon photonic chip[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13004.
- [44] Jiao W T, Cheng M, Wang K, et al. Demonstration of photonic-assisted microwave frequency measurement using a Notch filter on silicon chip[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(21): 6786-6795.
- [45] Song S J, Chew S X, Nguyen L, et al. High-resolution microwave frequency measurement based on dynamic frequency-to-power mapping[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42553-42568.
- [46] Jiang J F, Shao H F, Li X, et al. Photonic-assisted microwave frequency measurement system based on a silicon ORR[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 366-370.
- [47] Zhao Z Y, Zhu K, Lu L Y, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using few-mode fiber-based microwave photonic filters[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37353-37361.
- [48] 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.
- [49] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally sliced incoherent source[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 438-440.
- [50] Li Z, Zhang X M, Chi H, et al. A reconfigurable microwave photonic channelized receiver based on dense

- wavelength division multiplexing using an optical comb [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(9): 2311-2315.
- [51] 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.
- [52] Wang L X, Ning H Z, Wei L, et al. Polarization division multiplexed photonic radio-frequency channelizer using an optical comb[J]. *Optics Communications*, 2013, 286: 282-287.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Nguyen T A, Chan E H W, Minasian R A. Photonic multiple frequency measurement using a frequency shifting recirculating delay line structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3831-3838.
- [57] Nguyen T A, Chan E H W, Minasian R A. Instantaneous high-resolution multiple-frequency measurement system based on frequency-to-time mapping technique[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2419-2422.
- [58] Liu J L, Shi T X, Chen Y. High-accuracy multiple microwave frequency measurement with two-step accuracy improvement based on stimulated Brillouin scattering and frequency-to-time mapping[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(7): 2023-2032.
- [59] Shi T X, Chen Y. Multiple radio frequency measurements with an improved frequency resolution based on stimulated Brillouin scattering with a reduced gain bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 3460-3463.