

引用:张宁,马健新. 基于微波光子学的频率测量技术研究进展[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2025,38(5):679-692.

Citation:ZHANG Ning, MA Jianxin. Advances in frequency measurement techniques based on microwave photonics[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2025,38(5):679-692.

文章编号 1672-6634(2025)05-0679-14

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024120016

基于微波光子学的频率测量技术研究进展

张宁,马健新

(北京邮电大学 电子工程学院 信息光子学与光通信全国重点实验室 天地互连与融合北京市重点实验室,北京 100876)

摘要 目前基于电子学的微波频率测量已十分成熟,但仍然存在易受电磁干扰、难以实现高频率、大范围测量等弊端。融合了光子学与电子学优势的微波光子技术能够有效克服上述问题,在高频宽带微波信号测量方面具有大带宽、高频率、抗电磁干扰等明显优势。本文介绍了主要的微波光子频率测量技术的基本原理和典型实现方案,系统综述了近年来基于微波光子学的微波频率测量技术的研究进展,最后对各大类频率测量技术的优缺点进行了比较分析,并展望了微波光子频率测量技术的未来发展。

关键词 光子学频率测量;频率-幅度映射;频率-时间映射;频率-相位映射;频率-空间映射

中图分类号 TM935.1

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Advances in frequency measurement techniques based on microwave photonics

ZHANG Ning, MA Jianxin

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, and Beijing Key Laboratory of Space-Ground Interconnection and Convergence, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Microwave signal frequency measurement technology has an important application in modern science and technology, which is widely used in communication, radar, navigation and sensing and other fields. At present, the microwave frequency measurement based on electronics has been very mature, but there are still drawbacks such as susceptible to electromagnetic interference, difficult to realize high frequency and large range measurement. Microwave photonics technology, which integrates the advantages of photonics and electronics, can effectively overcome the above problems, and has obvious advantages in high-frequency broadband microwave signal measurement, such as large bandwidth, high frequency, and anti-electromagnetic interference. This paper introduces the main microwave photon frequency measurement technology of the basic principles and typical implementation of the program, a systematic review of recent years based on microwave photonics microwave frequency measurement technology research progress, and finally on the major categories of frequency measurement technology advantages and disadvantages of a comparative analysis, and look forward to the future development of microwave photon frequen-

收稿日期:2024-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61690195);信息光子学与光通信全国重点实验室开放课题(IPOC2020ZT06)资助

通信作者:马健新,男,汉族,博士,教授,研究方向:微波光子学与光通信技术,E-mail:majianxinxy@163.com。

cy measurement technology.

Keywords photonics frequency measurement; frequency-amplitude mapping; frequency-time mapping; frequency-phase mapping; frequency-space mapping

0 引言

频率作为微波信号的核心参量,其精确测量对通信、雷达、导航和传感等现代技术领域具有关键意义。传统基于电子技术的微波频率测量(频率计数法、混频法和时域反射法等^[1])虽技术成熟,但其受电子瓶颈限制,在 18 GHz 以上高频段面临灵敏度骤降、分辨率恶化等问题,且易受电磁干扰影响^[2-4]。难以满足复杂应用需求。而在许多现代科技应用场景中,比如 5G/6G 基站需要实时监测频谱占用以优化信道分配;相控阵雷达需通过瞬态频率分析实现高速目标的精确识别与跟踪;量子传感系统则依赖高分辨率测频技术探测微弱电磁场扰动等,对测频技术的带宽、灵敏度以及抗干扰能力提出了苛刻的要求。显然,基于传统电子学的测量方法难以满足上述需求。相比之下,基于微波光子学的频率测量技术通过光-电协同机制可突破上述限制,能够实现高频宽带信号的频率测量。例如在 5G/6G 通信系统中,基站需实时监测 0.7~40 GHz 频段内频谱占用状态以避免邻频干扰,在基于循环移频实现的光子辅助测频系统中,测量范围覆盖 0.25~50 GHz,且测量精度优于 ± 1 MHz^[5];在相控阵雷达目标识别中,针对 Ka 波段(26.5~40 GHz)高速隐身目标的瞬时频率捕获需求,基于同相/正交(I/Q)调制的瞬时频率测量(IFM)系统能够在迅速捕获未知频率信号,很好的满足了实际应用需求。光子技术在宽带信号处理方面的实时性强、功耗低、抗电磁干扰等优势,推动了光通信、雷达和传感等领域的发展。

随着微波光子技术在频率测量领域的深入发展,国内外研究人员提出了众多基于微波光子技术的频率测量方案,这些方案的基本结构可简化为图 1 所示,将待测微波信号调制在光波上,通过后续光域处理,实现微波频率到微波功率、时延、光功率和相位延迟等参量的映射,最后依据特定的映射关系求解即可得到待测的频率信息。

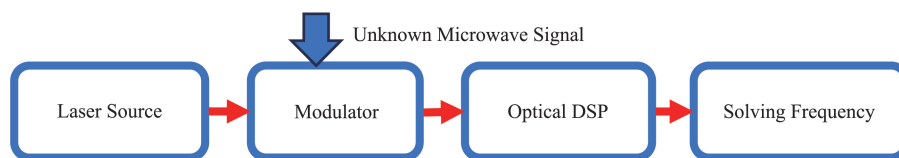


图 1 基于微波光子技术的频率测量系统的通用框图

Fig. 1 General block diagram of frequency measurement system based on microwave photon technology

自从美国的 Wang 等人将微波光子技术应用于微波频率测量以来,这一技术已取得了显著进展。目前,已发展出了基于频率-幅度映射、频率-相位映射、频率-时间映射、频率-空间映射等多种微波光子学频率测量方案。这些间接测量方法相较于直接频谱观测在抗干扰能力、灵活性、以及测量范围等方面有着显著优势。在这些方案中,频率-幅度映射与频率-空间映射的测量技术是最早受到研究者关注的。然而,它们存在的一些固有问题,如频率-空间映射的系统复杂度高,频幅映射系统大多适用于单频测量,且在测量性能上存在权衡等,这在一定程度上限制了它们的广泛应用,也催生了基于其他信息映射的测频方案的出现,如结构简单且适用于多频测量的频时映射方案,以及提供大范围、高精度的频率-相位映射方案等。微波光子学频率测量技术的发展目标是实现具有广泛测量范围、高精度、低复杂度和高系统稳定性的频率测量方案,以满足更广泛的应用需求。这一目标指引着技术的发展变化趋势,并成为研究者们的最终实现目标。在接下来的部分,我们将对已有方案的原理和技术发展脉络进行详细的梳理和分析。

1 频率-幅度映射测频技术

频率-幅度映射方案是将待测微波信号的频率信息转化为电信号或光信号的幅度信息,通过测量处理后信号的幅度获得待测微波信号频率信息。作为微波光子学领域中最早受到关注且最具代表性的测频方案之

一,已发展出大量基于频幅映射的测频方案。根据实现幅度映射的机理不同,目前已有方案中实现幅度映射的主要方法包括建立幅度比较函数(ACF),直流电压检测两种方法。这些方法各有优势,能够适应不同的测量需求和应用场景。

1.1 基于 ACF 的频率-幅度型频率测量技术

基于 ACF 的频率-幅度型微波频率测量方案是通过色散效应、非线性效应或者干涉器件对上下两路调制光产生与待测微波频率有关的功率变化,从而建立与待测微波频率有唯一确定关系的 ACF 来完成测频,构建 ACF 的核心是获得两路具有不同功率变化趋势的信号。

1.1.1 传统构建 ACF 曲线的方法。在色散介质中,不同波长的光信号以不同的群速度传播,在接收端引起不同的群延时和相位延迟,进而影响信号的幅度分布。利用这种与待测微波频率相关的幅度分布,可以构建 ACF,从而实现微波频率的测量^[6-9]。以参考文献[6]的方案为例,如图 2 所示,两个不同波长的光载波复用后被电光调制器进行双边带(DSB)调制,随后通过特定设计的多通道啁啾布拉格光栅(MCFG),使不同频率的光信号经历不同的时延,对应不同的功率衰落,并利用波分解复用器分离不同波长的光信号,实验实现了测频范围覆盖 4~12 GHz、测频误差在 100 MHz 以内的微波频率测量。

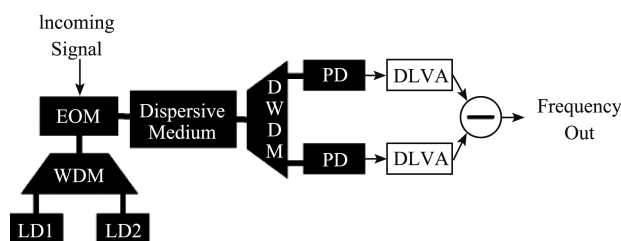
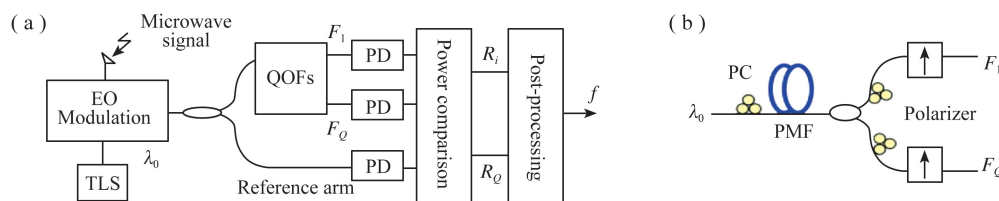


图 2 基于色散介质的频率-幅度映射方案^[6]

Fig. 2 Frequency-Amplitude mapping scheme based on dispersive medium^[6]

前述文献[6-9]基于色散原理构建 ACF 的方案中,为了获得不同功率衰落的输出信号,需要对不同波长信号进行复用与解复用或者是采用多段不同色散量的光纤,增加了系统复杂度。在光纤中传播的正交偏振光信号会引入不同偏振相关损耗(PDL),利用这一偏振复用的原理去构建 ACF 曲线^[10-13],避免了波分复用器和多段光纤的使用,可简化系统结构。参考文献[10]采用保偏光纤结合多个偏振控制器(PC)构建了光正交滤波器获得两路正交信号,如图 3 所示,两路信号分别与经过相同调制的参考信号功率做比得到两条待测微波频率与输出光功率之间的 ACF 曲线,进而求解得到未知频率,实现了覆盖范围 20~36 GHz,测量误差在 400 MHz 以内的微波频率测量。



注:(a) 系统结构图;(b) QOF 示意图。

图 3 基于偏振控制的测频方法^[10]

Fig. 3 Frequency measurement method based on polarization control^[10]

除了前述两种方法,研究人员还探索了利用受激布里渊散射效应(SBS)的相移谱^[14]或窄带增益特性^[15-17]去构建 ACF 曲线。相较于光纤色散与偏振复用的方法,该方法在测量性能方面表现更优异。以吉林大学团队的方案为例^[15],以扫描间隔小于二分之一 SBS 增益谱宽的扫频信号作为探测光源,利用两个不同频率的扫描探测光,在同一增益谱内得到了两个不同幅度的信号,基于两个输出微波信号功率构建 ACF,实验实现了测量范围在 0.47~23 GHz,分辨率高达 8 MHz 的大范围高精度频率测量。

然而,ACF 曲线的非线性特性导致了测量范围和分辨率之间的权衡问题。研究人员针对这一固有问题

提出了一系列改进方案。比如,在强度调制和相位调制条件下,色散导致的微波功率衰落呈现出完全互补的特性,式(1)所示,利用二者之比构建 ACF,可在测量分辨率不恶化的条件下进一步扩大测量范围。

$$P_{\text{IM}} \propto \cos^2\left(\frac{\pi D^2 \lambda^2 f}{c}\right), P_{\text{PM}} \propto \sin^2\left(\frac{\pi D^2 \lambda^2 f}{c}\right). \quad (1)$$

以参考文献[18]的方案为例,利用并列的 PM 与 MZM 对光载波分别进行调制深度相同的强度调制与相位调制,经过完全相同的单模光纤传输后,获得了微波功率衰落完全互补的两路信号,频率测量范围覆盖了 0~13.8 GHz,测量误差为±300 MHz。然而,在基于色散的光纤链路中为了确保携带待测微波信号频率信息的光信号在光纤传输过程中能够引入足够的时延差以形成单调性更好的 ACF 曲线,通常需要使用长达几十千米的光纤作为色散介质,这导致系统响应时延的增加。为了克服这一问题,一些研究人员选择使用 MZI 来替代色散光纤引入时延差^[19-22],由于 MZI 的长度仅为几米,在系统得到简化的同时测量精度也得到提升。如参考文献[19]中,强度调制与相位调制信号经完全相同的 MZI 传输后,也获得了微波功率衰落完全互补的两路信号,相较于文献[18]测量误差仅为±30 MHz。调制深度相同的强度调制与相位调制的获得还可通过其他多种方式实现,包括 PM 级联起偏器^[21-24]、PolM 级联两个偏振控制器^[25]、PolM 级联起偏器^[26]。

1.1.2 测量范围可调谐的 ACF。尽管基于输出信号互补功率特性的方法在扩展频率测量范围方面具有一定的潜力,但其扩展能力相对有限,仍然难以同时满足大范围和高分辨率的测量需求。为了克服这一问题,研究人员开始探索能够灵活调节频率范围与分辨率的测量技术,并提出了一系列创新方案。这些方案旨在提供更广泛的测量范围和更高的测量分辨率,以适应多样化的测量需求。目前,实现测量范围与分辨率调谐的方法包括波长调谐、DP-MZM 主直流偏置调谐、偏振方向调谐,以及可伸缩结构等其他方式。

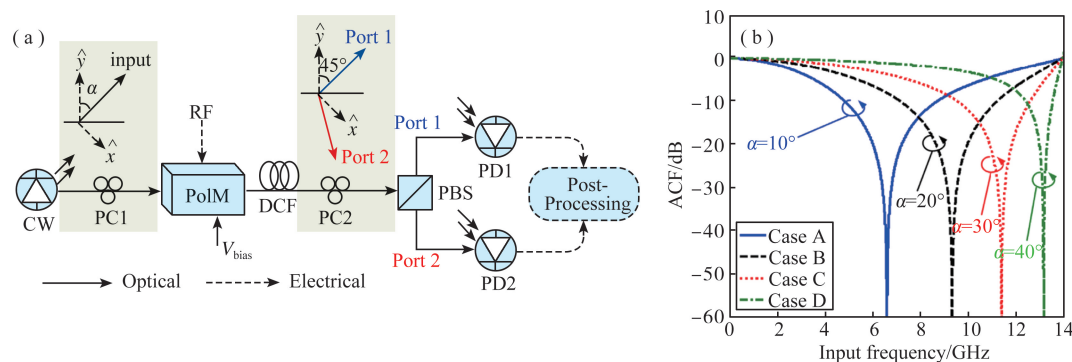
最早的测量范围的调谐就是通过改变激光源波长实现的,2008 年 Zou 等采用具有较大波长间隔(几十纳米)的光信号作为复用光载波,单模光纤作为色散介质建立 ACF 曲线,实验中在测量误差固定在 100 MHz 以内,光源波长组合分别为 1 470、1 600、1 470 和 1 500 nm 的条件下,实现了测量范围分别为 11.5~15.6 GHz,5~15.6 GHz 的频率测量^[27]。但由于波长调谐引起的色散变化相对较小,因此可调范围较小,通常只有几 GHz,且易受到光源波长漂移的影响。为解决这些问题,研究人员进一步探索了与双平行 MZM 调制器(DP-MZM)主直流偏置相关的测量范围与分辨率的调谐方法。通过简单调节主直流偏置电压即可实现测量范围的调谐^[28-29],但此类方案需要预先知道待测微波信号的频带范围,对于未知频段范围的信号需要反复调节,且系统会受到偏置电压漂移的影响。

为了克服上述[27-29]方案中的挑战,基于偏振控制的测量范围可调方案被提出,以北京交通大学设计的基于单光源载波的偏振方向调节的测量范围与分辨率可调谐测量系统为例^[30],如图 4(a)所示,光载波经偏振控制器 1(PC1)注入 PolM,以承载待测微波信号。该信号经色散补偿光纤(DCF)传输后,通过偏振控制器和偏振分束器将两个偏振方向的光信号分离为两路输出,由 ACF 表达式 2 可知,在保持色散有关参量不变的条件下,调节 PC1 与 PolM 调制器主轴的夹角 α 即可实现频率测量范围的调谐。如图 4(b)所示,ACF 曲线的陷波频率点随 α 改变而变化,对应测量范围的变化。此外,由 ACF 表达式可知在保持 α 不变时,通过改变 DCF 的色散量也可实现测量范围的调节。后来,研究人员利用不同结构的调制器实现了多种基于偏振方向调谐的测量范围可调的测频系统,比如双偏振调制器(DPol-MZM)^[31]、双偏振双驱动调制器(DPol-DMZM)^[32],PM 调制器与偏振控制器级联^[33],其中,北京邮电大学提出的基于 PolM 的方案^[34],最大可调谐范围能覆盖 3~42.8 GHz。

$$F_{\text{ACF}} = \frac{-\sin^2\left(\frac{\lambda_0^2 DL \Omega^2}{4\pi c} - 2\alpha\right)}{-\sin^2\left(\frac{\lambda_0^2 DL \Omega^2}{4\pi c} + 2\alpha\right)}. \quad (2)$$

除上述常规的调节方法外,研究人员还提出了其他测量范围调节方案。如级联多个测量模块^[35]、利用偏振复用仿真器(PDME)调节正交极化信号的色散群时延^[36]、调节双对称 SBS 系统两探测光支路中两段高

非线性光纤(HNLF)的谱线中心增益系数差值和布里渊频移差值^[37]、调节可调光延时线的延时量^[38]等,这些方法均可实现了测量范围与分辨率的调谐。



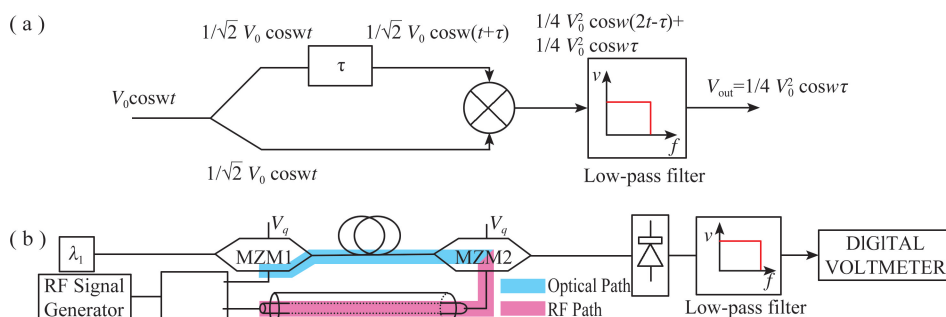
注:(a) 系统结构图;(b) 可调谐 ACF 曲线示意图。

图 4 基于偏振控制的测量范围可调谐测频系统^[30]

Fig. 4 Range tunable frequency measurement system based on polarization control^[30]

1.2 基于直流电压检测的频率-幅度型频率测量技术

该类型方案是通过建立待测微波频率和光电探测器的输出直流电压之间的确定数学关系,将频率信息转化为直流电压信息进行测量。该技术主要依赖于 HNLF 的四波混频效应^[39]、双折射效应^[40]或光学混合产生直流电压信号^[41-42]。具体来说,如图 5(a)所示,两路有相对时延的信号相乘后低通滤波产生一个直流分量,其幅度随输入信号频率与时延 τ 的乘积呈正弦变化。在时延 τ 已知的情况下,频率信息可以转换为直流电压信号的幅度,实现频率测量。以文献[41]为例,如图 5(b)所示,上路待测信号通过 MZM1 调制后,经光纤引入时延,形成新的光载波。随后被下路延时后的待测信号再次调制。经光电转换后,信号通过低通滤波器处理后用直流电压表检测输出信号,信号相对延时 τ 已知进而计算得到待测微波信号频率。然而,该方案必须知道待测微波信号的功率,才能实现无模糊的频率测量。同年,Emami 等利用两抽头横向滤波器实现的希尔伯特变换器使系统扩展到与待测微波信号功率无关的频率测量,通过比较两路相位差 90° 的直流电压信号得到与待测微波频率无关的直流信号,实现无模糊频率测量^[42]。然而,文献[41,42]方案中由于射频电缆的损耗和色散,测量带宽受限在 10 GHz 左右。2009 年,Lam Anh 等利用 HNLF 的四波混频效应^[39]克服了这一限制,有相对时延的不同波长光信号在 HNLF 中发生 FWM 后可得到功率随输入待测微波信号频率变化的闲频光,由闲频光的功率可推断待测信号频率。后来,该组又利用 HNLF 结合多通道、光子希尔伯特变换实现了与待测微波信号功率无关的并行正交频率测量^[43]。基于直流电压检测的频率-幅度映射测频方案相较于建立 ACF 的方案只需低速直流光电探测器,系统成本更低。



注:(a) 原理图;(b) 系统结构图。

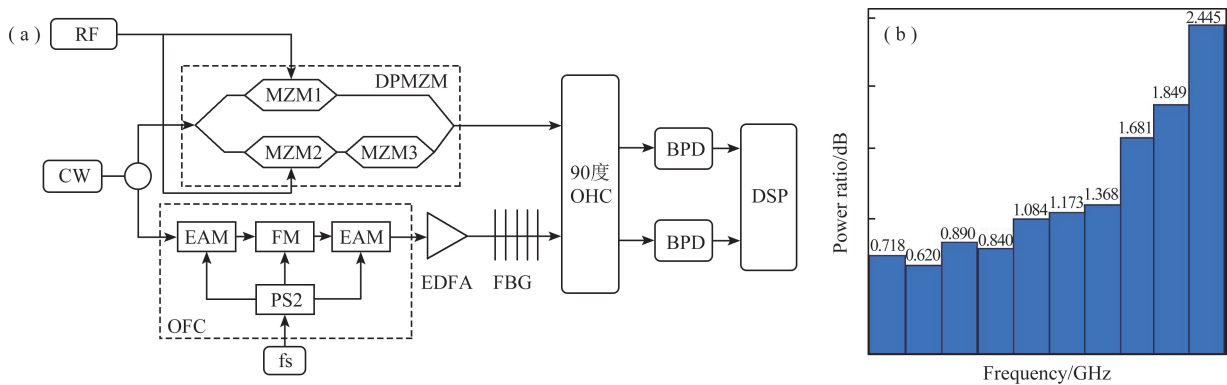
图 5 基于宽带混合的直流电压检测法^[41]

Fig. 5 DC voltage detection method based on broadband mixing^[41]

1.3 其他与功率有关的技术

1.1 与 1.2 节介绍的基于 ACF 曲线和直流电压检测的测频方案中,只能进行单一频率测量。近几年,

研究人员提出利用非平坦光频梳的梳齿功率比实现多频率瞬时频率测量^[44-46]。如图 6 所示,河南理工大学将上路光信号注入 DPMZM 后被待测微波信号进行载波抑制的单边带调制(CS-SSB),下路光信号首先经 EAM 和 PM 级联调制生成频率间隔相同且具有高平坦度的 OFC,然后利用光纤布拉格光栅(FBG)对 OFC 进行频域不平坦的功率衰减,从而获得阶梯状的非平坦光频梳;两路信号通过 90°光混频器混频后进行光电转换,每个信号与其前后两个相邻的梳齿信号拍频,产生的拍频信号功率比与非平坦光频梳的梳齿功率比有关,以功率非均匀下降的梳齿功率比为参照,即可得到待测微波频率^[45]。2023 年,北京交通大学直接将待测微波信号与锯齿波信号同时调制在光载波上,产生与待测微波频率有关的非平坦光频梳,简化了系统结构^[46]。然而,当待测微波频率恰好位于两个梳齿中间位置、或位于两个梳齿的分界处、或多频测量时两个待测微波频率位于同一对梳齿通道的对称位置都会引起频率模糊。随后,该组又设计了采用包含两路不同梳齿间距的 OFC,有效解决了上述频率模糊问题。



注:(a) 系统结构图;(b) OFC 相邻两齿梳之间的功率比。

图 6 基于非平坦 OFC 的频率测量系统^[45]

Fig. 6 Frequency measurement system based on non-flat OFC^[45]

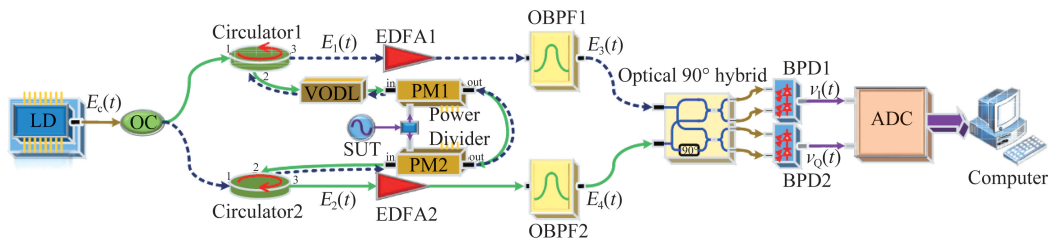


图 7 频率-相位映射的微波频率测量系统^[47]

Fig. 7 Microwave frequency measurement system with frequency-phase mapping^[47]

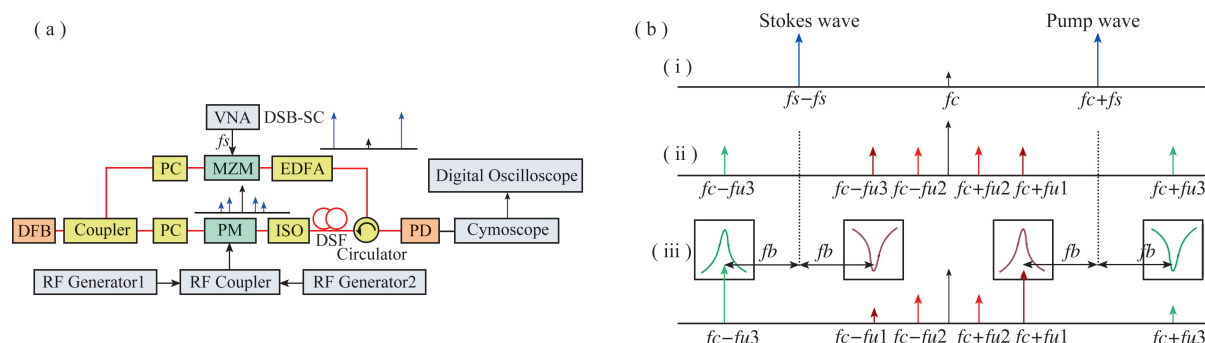
2 频率-相位映射测频技术

频率-相位映射方案是将微波信号的频率映射成为输出信号的相位实现高精度测量的一类瞬时测频方案。在该类型方案中,待测频率与输出信号相位或相位斜率之间存在线性映射关系,从根本上避免了基于 ACF 的测频方案中测量范围与分辨率间的权衡问题。2019 年,南京航空航天大学提出一种新颖的基于 I/Q 光混频技术的频率-相位斜率映射方案^[47],如图 7 所示,两路待测微波信号经过包含相位调制器和可调光延时线的双向光路实现相位调制和延时,仅使待测信号之间引入相对时延,由光带通滤波器(OBPF)滤出的一阶带带经光域混频和光电转换即可获得频率-相位斜率的映射关系。不同于以往需要偏置点或偏振控制的级联调制混频方案,该系统中的 I/Q 混频是通过 90°Hybird 与平衡光电探测器实现,系统稳定性更好。但 I/Q 相位失配与幅度噪声可能会对测量精度造成一定影响。2020 年,吉林大学 Wang 等将 SBS 相移谱应用于相位映射系统实现多个频率的同时测量,使频率与布里渊相移曲线的斜率呈单调的映射关系,通过曲线的反函数可得到待测的微波信号频率^[48];进一步地,该组用两个泵浦光代替单个泵浦,实现布里渊增益-损耗

补偿,突破了2倍布里渊频移量的测量范围限制。2021年,该组使探测光路的参考射频信号保持不变,在泵浦光支路先通过射频调制产生OFC替代原来的单频光载波,新的光载波经MZM调制承载待测微波信号,实现了由频率梳梳齿数量控制的测量范围可调测频系统^[49]。2022年,Charles Darwin大学的Huang等仅用一个DDMZM结合FBG的反射滤波特性获得了两路信号,通过检测两路输出信号的相位差可确定待测微波信号频率^[50]。近年来,基于频率-相位映射的测频技术作为微波光子学领域的新兴方案,已经展现出其在测量范围扩展和测量精度提升方面的显著潜力。尽管目前该领域的研究方案尚属少数,但它们无疑为微波光子技术在频率测量领域的进步提供了创新的途径和研究方向。

3 频率-时间映射测频技术

当前,无论是基于频率-幅度映射还是频率-相位映射的测频技术,它们主要被应用于单频信号的测量场景。然而,在现代雷达、通信系统以及其他先进应用领域中,对于能够同时对多个频率进行精确测量的技术需求日益增长。在这一背景下,基于频率-时间映射的测频方案因其能够实现多频率的同时测量而受到广泛关注,成为该领域最典型的解决方案。该类型方案是将待测微波信号通过电光调制器调制到光波上,通过光学时间映射组件将信号频率映射到时间域,经过光电转换输出与时间有关的微波脉冲,通过测量微波脉冲相对时延或时间间隔获得待测微波信号频率信息。光信号在色散光纤、啁啾布拉格光栅等色散介质中的传播速度与光波频率密切相关,因此利用色散介质的这一特性可以将光信号频率与时间关联起来^[51]。近年来,基于扫频组件的频率测量方案得到了广泛研究与发展,本章节将重点介绍基于扫频组件的频率测量技术。



注:(a)系统结构图;(b)各阶段频谱图。

图8 基于波长扫描的频率-时间映射系统^[53]

Fig. 8 Frequency-time mapping system based on wavelength scanning^[53]

基于频率或波长扫描的频率-时间映射方案是利用扫频光承载待测信号,在光域建立时间和待测微波频率之间的映射关系来完成测量。其中,扫描功能是通过扫描组件实现的,包括扫频光源^[52],扫频微波源^[53-59],扫频光滤波器^[60],扫频光电振荡器^[61-62]。该类型的测量方案提出相对较晚,但应用更为广泛。该技术发展初期通常以扫频光源作扫频组件,然而,由于扫频激光器的扫频速度限制,使得系统响应时延成为一个严重问题。以扫频微波源作为扫频组件,系统响应的时延取决于扫频参考信号的扫描速率,时延可显著降低,可达毫秒量级。以浙江大学团队的方案为例,待测微波信号与参考频率信号分别进行DSB-SC与相位调制后,分别作为泵浦光和探测光参与到SBS过程,如图8所示,随着参考频率在频域中扫描,当泵浦光频率与探测光频率满足特定的数值关系时,该时刻对应频率的探测光被放大,光电探测器输出的与探测光信号对应的电流幅度显著增强,进而建立起了频率时间映射,通过示波器测量最强电流出现的时间,可推算出待测信号频率^[53]。为了改进测量范围与精度,后续涌现出多种优化方案^[54-60]。如,吉林大学利用级联调制器实现双级泵浦将测量范围从2倍布里渊频移(f_b)扩大到4倍 f_b ^[54];华中科技大学利用两段光纤级联实现双级泵浦获得比单级泵浦更窄的增益谱,并结合非线性拟合算法使测量分辨率由30 MHz提高到18 MHz^[55];Liu等先将光载波移频至布里渊增益谱出现位置,再用扫频参考信号调制获得探测光。这使得探测光仅能扫描单侧边带信号,避免了由 f_b 引起的测量范围受限问题^[56],并结合参考频率标定与曲线平滑处理的双重

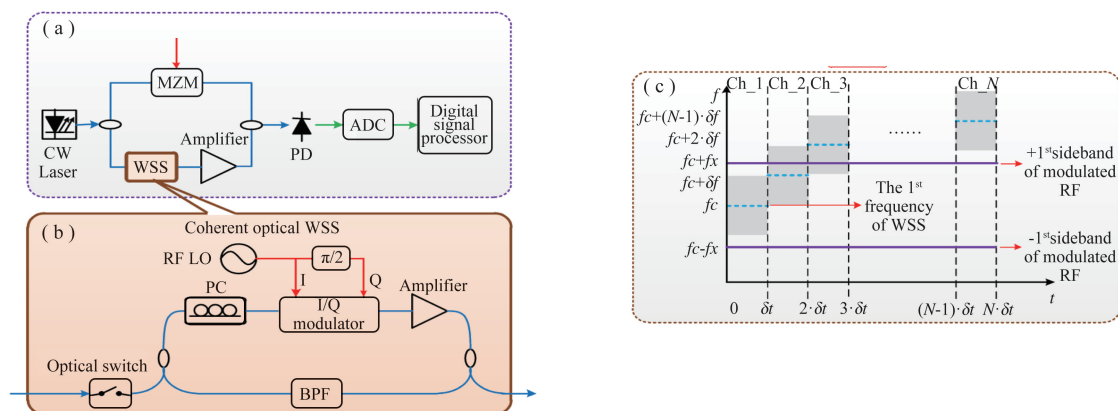
精度提高技术,使测量误差显著降低至 1 MHz 以内;华中科技大学利用切趾光纤布拉格光栅 (AFBG) 的反射和透射特性为 SBS 同时提供泵浦光和探测光,既简化了系统又消除了测量盲区^[57];吉林大学^[58]与华东师范大学^[59]利用 SBS 增益谱与损耗谱叠加获得更窄带宽的增益谱提高了系统分辨率与测量精度。尽管结合扫频微波源与 SBS 效应的扫频方案在一定程度上减少系统响应时间,但与 IFM 系统相比,仍存在显著差距。如何在保证系统拥有较短测量时间的同时,又能实现多频测量,是基于时间映射方案急需解决的问题。

傅里叶域锁模光电振荡器 (FDML OEO) 的快速扫频能力为这一问题的解决提供了新思路。2018 年,中国科学院半导体研究所设计了一种基于傅里叶域锁模光电振荡器 (FDML OEO) 的频率测量方案^[61],利用 FDML OEO 可通过自激振荡产生快速扫频光,建立了输入微波信号频率与输出脉冲时间差之间的关系,得益于 FDML OEO 的快速扫频能力,系统响应速度得到提升;次年,该组进一步改进了该方案,采用工作在阈值附近的傅里叶域锁模光电振荡器,不仅保持了快速响应时间,还简化了系统结构^[62]。

为了进一步提高系统响应时间,近几年,研究人员提出了一种基于短时傅里叶变换 (STFT) 的新型频率测量方案。STFT 通过将信号分段、加窗,并在每个小片段内进行傅里叶变换,然后将不同时间窗口对应的频域信息拼接成二维时频图,从而建立频率与时间之间的关系。比如,2022 年,华东师范大学提出了基于 SBS 效应的短时傅里叶变换^[63],快速周期扫频信号和待测微波信号分别驱动两个级联的电光调制器作为探测光参与 SBS 过程,SBS 的窄带增益不仅提供了一个带通滤波器配合周期扫频信号建立了窗函数,而且依据频率-时间映射生成的电流脉冲信号获得了频域信息;随后,该组用低速周期性锯齿/三角波作为分布式反馈激光二极管的驱动电流,产生周期性扫频光,替代原有系统中用任意高速波形发生器产生周期扫频信号,避免了高频电子器件的使用^[64];2023 年,该组又利用扫频泵浦光替代原有系统的单频泵浦光展宽了 SBS 增益谱带宽,在快速周期扫频信号作用下,测量精度由单频泵浦光条件下的 40 MHz 大幅提升至 4 MHz^[65]。2024 年,中国科学院的 Dong 等利用偏振复用 DPMZM 结合电域滤波实现了 STFT,通过输出电域脉冲的时间差分析,计算出待测微波信号频率,进一步优化了测量方法^[66]。

4 频率-空间映射测频技术

频率-空间映射是指通过使用光学器件,如 OFC、标准具、FBG 等,将频率信息转换为不同空间位置的分布或者不同光学通道输出幅度在频域或时域上的分布,实现信道化处理。这个过程也被称为光子型信道化接收机。基于频率-空间映射的频率测量技术是最早受到关注的一类多频测量技术。尽管频率-空间映射技术相较于第 3 节介绍的频率-时间映射技术更早被提出,但碍于其较高的系统复杂度和成本,进一步的发展和广泛应用受到了一定限制。



注:(a) 系统结构图;(b) 相干波长选择开关结构图;(c) 时域信道划分。

图 9 基于循环频移的 TDM 信道接收机^[67]

Fig. 9 Cyclic frequency shift based TDM channel receiver^[67]

4.1 TDM 式信道化接收机

时分复用 (TDM) 是指通过时间分割的方式实现多路信号的复用。基于 TDM 的测频技术通过波长扫

描或延时组件实现时分复用,将不同时间段内的信号分配到不同的信道上进行处理,这与基于频率-时间映射的方法不同。后者通常通过色散介质或扫频组件将频率信息转化为时域信息,然后通过分析输出微波脉冲信号的出现时间或脉冲间的时间差来确定待测信号的频率。以清华大学方案为例^[67],利用光开关、I/Q调制器和带通滤波器搭建一个循环频移的波长扫描源,如图9所示,被待测信号调制的已调信号与携带参考频率信息的循环频移信号相互拍频后进行数字信号处理,在每一个时间窗口内都对应唯一的WSS频率,通过计算每个时间通道内拍频频率与参考频率的频率差就可以得到待测信号频率。随后,该组又先后利用相干探测^[68]、奈奎斯特探测技术^[69]提高了TDM式信道化接收机的测量速度和范围;2017年,北京邮电大学搭建了并行的光延时线阵列,结合啁啾光脉冲和I/Q解调技术实现了TDM式信道化接收机^[70]。该系统基于延时量的改变来构建TDM信道,通过对各个信道输出的中频信号进行探测就可以精确地推算出待测信号的频率。由于只需对中频信号进行探测,降低了系统对PD带宽的要求。

4.2 WDM式信道化接收机

采用TDM技术的频率测量方法虽实现较为简单,但不可避免地会引入测量延迟,并且在同步各个时间片的过程中,可能会遭遇带宽利用率不足的问题。与此相比,WDM技术能在一根光纤中同时传输多个不同波长的信号,显著提升了光纤的传输容量和频谱效率。因此,WDM技术逐渐成为基于频率-空间映射的测频方案中的主流技术。其实现的基本原理是先将待测微波信号调制到光载波上,再利用光学滤波器在波长域上将其分成若干子信道,通过监测每个子信道的功率来确定待测微波信号的频率。

波长域划分是先通过电光调制将待测微波信号的频率复制到具有均匀频率间隔的光载波阵列上,再使用与光载波频率间隔略有不同的单周期梳状滤波器从不同的光学复制中选择射频光谱的不同切片^[71-73]。随后,通过波分解复用器分离子带,并用光电探测器阵列检测每个子带功率,每个子信道输出信号功率是待测微波信号频率的函数,从而获得待测微波频率。2007年,Volkening等利用一组具有相等波长间隔的激光光源构建了频率间隔为99.5 GHz的光载波阵列^[71],将待测微波信号调制到合束后的光载波上,如图10(a)所示。随后,将已调信号送入周期为100 GHz的F-P(法布里-珀罗)标准具中进行滤波,不同波长的子带经波分解复用器分离后映射到不同的子信道进行光电探测,最后从检测到的每个子带功率推算待测微波信号频率。然而,使用多激光光源增加了系统复杂度,且由于多激光源的波长间隔是固定的,系统测量范围不可调谐。2011年,Brès等利用参数波长多播的方法设计了测量范围可调谐的信道化接收机^[72],通过调整混频器的两个泵浦光与种子光信号的频率,可实现频率测量范围的调谐,以满足不同的信道化接收要求。然而,不同波长光载波之间的功率波动很大,系统稳定性较差。后续研究中,研究人员利用高稳定性的OFC实现了测量范围与测量精度的调谐。以文献^[74]为例,通过级联马赫-曾德尔调制器(MZM)生成梳齿间隔均匀的OFC作为多波长光源,将待测微波信号调制到OFC梳齿上,再采用间隔略大于OFC的F-P标准具滤波,最终通过波分解复用和光电探测解析频率信息,如图10(b)所示。该方案通过简单调节OFC间隔与F-P标准具间隔,实现了测量范围为0.5~11.5 GHz或0.75~17.25 GHz,精度在0.5 GHz或0.75 GHz以内的多频率测量。相较于^[72]的方案,OFC不同梳状线之间的功率波动仅有1 dB,系统更稳定。

F-P滤波器因稳定性与波长对准问题限制了系统性能,而相干OFC可有效解决该缺陷。以北京邮电大学的团队提出的方案为例^[75],待测宽带微波信号经MZM的上支路调制至OFC梳齿后,通过波分解复用器与下支路OFC混频实现相干探测。利用两路OFC的自由频谱范围(FSR)差异提取射频频谱切片,并结合后续I/Q解调推算频率。国防科技大学^[76]、南京航空航天大学^[77]、上海大学^[78]等团队也开发了类似接收机。由于基于WDM的信道化频率测量方案需要大量的光电转换器件,导致体积和功耗较大,而基于TDM的方案仅需单组光电转换器件。为此,美国IMRA公司提出WDM与TDM融合方案,在SBS窄带滤波特性基础上,利用两束相干OFC和循环光频移(ROFS)设计了一种在每个WDM信道内实行TDM划分的测频方案^[79],如图11所示,上支路具有超宽频带的待测射频信号经MZM调制到OFC1的梳齿边带后,波分解复用后,OFC1的边带与下支路OFC2的相应梳齿混频,从而将待测微波信号的几个频谱切片(每个WDM通道一个)下变频至基带进行数字化,随后数字信号处理求解待测微波频率。其中,OFC2每次经ROFS移频后与OFC1的边带混频可测量每个WDM通道内宽带信号的不同频谱范围,从而在WDM通道内实现

TDM 划分。然而,与 TDM 式方案类似,该系统无法对快速变化(持续时间在微秒及以下)的信号进行频率测量。后续改进通过级联光纤循环延迟线用于短时信号的复制^[80],从而可以捕获并测量大带宽、持续时间短的信号,但系统复杂度因级联多级调制器而增加。近年还涌现出 OFC 结合光域混频^[81]、可调 OFC 与 SBS 效应结合^[82]、以及 FBG 和可调谐 OBPF 组合^[83]等新型信道化方案,进一步扩展了宽带测频技术路径。

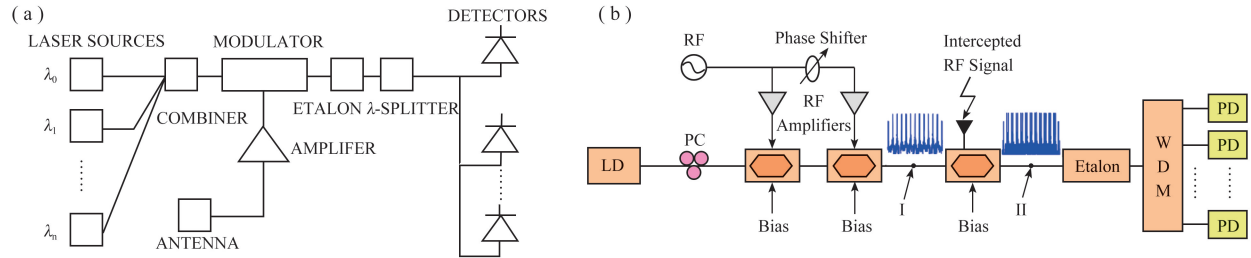


图 10 (a) 基于波长域划分的 WDM^[71]; (b) 基于光学频率梳的 WDM 式信道化接收机^[74]

Fig. 10 (a) WDM based on wavelength division^[71]; (b) Optical frequency comb-based WDM-style channelized receiver^[74]

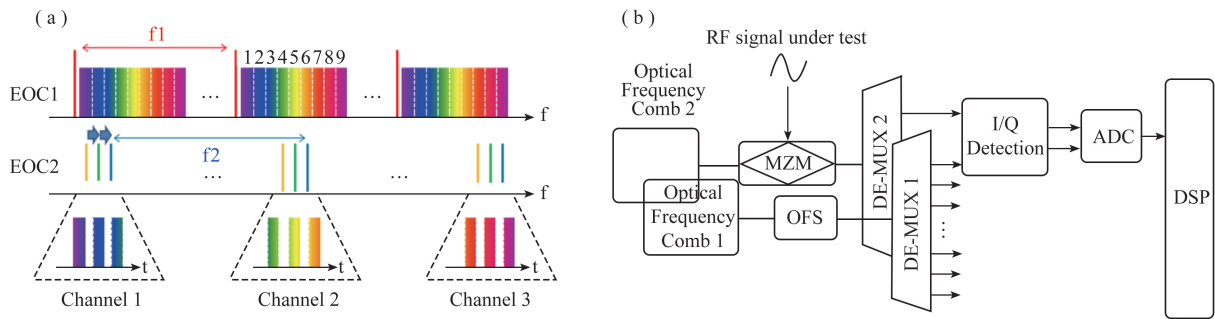
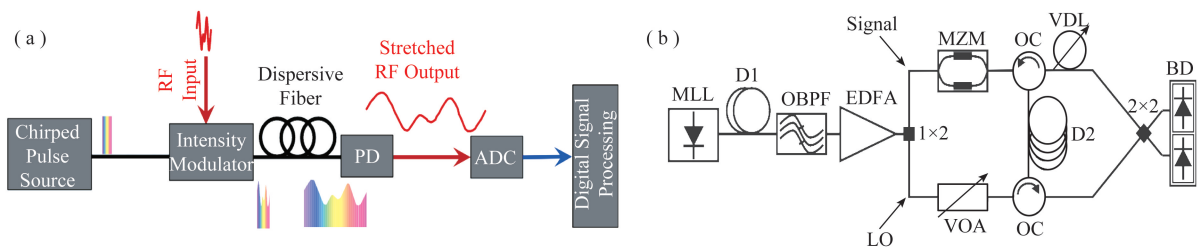


图 11 (a) WDM 与 TDM 结合原理图; (b) 系统结构图^[79]

Fig. 11 (a) Schematic diagram of combining WDM and TDM; (b) System structure diagram^[79]

5 基于光子时间拉伸的微波频率测量技术

光子时间拉伸(PTS)是指利用光在介质中传播的速度差异,特别是不同波长的光在光纤等介质中的时间延迟,来实现对光信号的时间拉伸,从而降低信号的瞬时带宽,使现有的电子采集设备能够捕捉和处理这些信号。



注:(a)基本原理图; (b)系统结构图。

图 12 基于光子时间拉伸的频率测量系统^[85]

Fig. 12 Frequency measurement system based on photon time stretching^[85]

基于 PTS 技术进行频率测量的基本方法是先将待测微波信号的幅度调制到频率啁啾光脉冲上,然后将脉冲序列通过色散介质进行时域线性扩展即频域压缩,并通过光电探测器转换为电域方便处理的窄带电信号进行模数转换和数字域处理,根据时频域转换的对应关系获得待测微波信号的频谱信息。2013 年,美国加州大学的 Buckley 等利用 PTS 技术实现了超宽带的瞬时频率测量^[84],如图 12 所示,由锁模激光器(MLL)产生的一系列超短光脉冲经过第一段色散光纤(D1)进行时间展宽,并通过 OBPF 选择特定波长范围的光。经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后的脉冲分为两路,一路作为本振(LO)信号,另一路通过 MZM 进

行待测信号的调制。然后,两路信号通过第二个色散元件(D2)再次进行时域展宽,耦合后的信号进入光电探测器阵列将光信号转换为电信号,实现了对高速信号的时间拉伸和频谱分析,从而得到待测微波信号频率信息。2015年,清华大学采用正交调制器法,成功实现对频率范围为0.5~5 GHz的雷达脉冲流用520 MHz采样速率的模数转换器精确恢复^[85]。PTS技术为宽带高频信号的频率测量提供了一种解决思路。

6 结论

本文综述了基于微波光子学的频率测量技术,介绍了其基本原理及实现方式。根据工作原理的不同,这些技术可分为频率-幅度映射、频率-相位映射、频率-时间映射、频率-空间映射以及光子时间拉伸五大类。频率-幅度映射通过建立与待测微波频率相关的ACF,检测直流电压,将其与输出信号功率关联;频率-相位映射通过电延时或光延时在已调信号中引入频率相关相位信息,再通过相位分析提取频率;频率-时间映射利用时间映射组件将频率信息转换到时域,通过时域分析计算频率;频率-空间映射通过信道化接收机将信号分散到不同子信道,检测各信道功率以获取频率信息,适用于多频测量;光子时间拉伸则通过时频转换关系获取频谱信息,为高速宽带信号测量提供解决方案。

基于微波光子学的频率测量技术已成功克服传统电子技术在宽带高频测量中的局限性,频率范围扩展至40 GHz甚至更高。然而,其性能仍受光电器件固有特性的限制,如电光调制器带宽和光电探测器效率不足。近年来,新型材料与先进制造工艺为解决这些问题提供了新途径。非线性光学材料(如薄膜铌酸锂、二维材料)凭借高非线性系数、超快载流子动力学等特性,提升了调制器带宽和探测器灵敏度。纳米制造技术(如电子束光刻、自组装工艺)推动了亚波长光学结构、超表面及异质集成光子芯片的发展,实现了功能单元的单片化,降低了系统体积和耦合损耗。此外,高Q值微环谐振器的低成本量产为片上频率鉴别与信号处理提供了高稳定性解决方案。尽管集成化和芯片化带来了显著优势,但材料界面兼容性、工艺精度与规模化成本仍是亟待突破的瓶颈。未来,通过跨学科协同创新,将新材料特性与纳米级工艺深度融合,有望在片上非线性增强、光电转换效率提升及抗干扰设计方面实现突破,推动微波光子测频系统向更高集成度、更低功耗及更优经济性方向发展。

参 考 文 献

- [1] EAST P W. Fifty years of instantaneous frequency measurement[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(2): 112.
- [2] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [3] ZOU X H, LIU B, PAN W, et al. Photonics for microwave measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(5): 711-734.
- [4] YAO J P. Microwave photonics[C]//2012 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation (IWEM), August 06-09, 2012, Chengdu, China: IEEE, 2012, 1-2.
- [5] 戴泽璟,陈曦,王鹏,等. 微波光子循环移频实现大带宽高精度射频频率测量[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(5): 455-460.
- [6] NGUYEN L V T, HUNTER D B. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10): 1188-1190.
- [7] LI Z, LI M, CHI H, et al. Instantaneous microwave frequency measurement with a uniform resolution and improved dynamic range[C]//2012 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), September 11-14, 2012, Noordwijk, Netherlands: IEEE, 2012, 124-127.
- [8] LIN T, ZOU C W, ZHANG Z K, et al. Differentiator-based photonic instantaneous frequency measurement for radar warning receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 3942-3949.
- [9] LI J K, LIU H X, YANG Q Y, et al. Microwave frequency measurement based on frequency-power mapping[C]//2022 21st International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), September 27-30, 2022, Xi'an, China: IEEE, 2022, 303-306.
- [10] 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.
- [11] LUO 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.
- [12] PAN S L, YAO J P. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter pair[J]. IEEE Photonics Tech-

- nology Letters, 2010, 22(19): 1437-1439.
- [13] 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.
- [14] LI W, ZHU N H, WANG L X. Brillouin-assisted microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 166.
- [15] WANG D, PAN L B, WANG Y, et al. Instantaneous microwave frequency measurement with high-resolution based on stimulated Brillouin scattering[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 171-176.
- [16] 廖伟洁. 基于SBS效应的微波瞬时频率测量研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
- [17] WANG X, YANG Y Y, XU Y Q, et al. Power-independent microwave instantaneous frequency measurement based on combination of brillouin gain and loss spectra[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1-7.
- [18] 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.
- [19] 李棕,田朝辉,韩喆. 基于射频响应互补的光子辅助瞬时测频[J]. 半导体光电, 2023, 44(5): 811-816.
- [20] WANG G D, LI X, MENG Q Q, et al. Instantaneous frequency measurement with full FSR range and optimized estimation error[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(18): 6123-6130.
- [21] WANG D P, XUN K, DAI J, et al. A photonic approach for instantaneous microwave frequency measurement based on simultaneous phase modulation and intensity modulation using Mach-Zehnder interferometers[C]//2012 4th International High Speed Intelligent Communication Forum (HSIC), May 10-11, 2012, Nanjing, China: IEEE, 2012, 1-3.
- [22] WANG D, XU K, DAI J, et al. Photonic instantaneous microwave frequency measurement based on phase modulated links with interferometric detection assisted by a polarizer[C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China: IEEE, 2011, 1-7.
- [23] 李棕,张建国,韩喆. 基于非平衡双臂马赫-曾德尔干涉仪的瞬时测频[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 1712001.
- [24] 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.
- [25] PAN S L, YAO J P. Instantaneous photonic microwave frequency measurement with a maximized measurement range[C]// 2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics. (October 14-16, 2009) Valencia, Spain: IEEE, 2009, 1-4.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LI W, ZHU H N, WANG L X. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel mach-zehnder modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(2): 427-436.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] LI X Y, WEN A J, MA X M, et al. Photonic microwave frequency measurement with a tunable range based on a dual-polarization modulator[J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8727-8731.
- [32] 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): 1-11.
- [33] 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.
- [34] GUO Y T, MA J X. Photonic instantaneous microwave frequency measurement with adjustable measurement range based on an electro-optical polarization modulator[J]. Applied Optics, 2020, 59(7): 1808.
- [35] YANG C W, WANG L, LIU J G. Photonic-assisted instantaneous frequency measurement system based on a scalable structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1-11.
- [36] SHI D F, LI G Y, JIA Z Y, et al. Accuracy enhanced microwave frequency measurement based on the machine learning technique[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 19515.
- [37] 蔡威斌,张家洪,赵振刚. 基于双对称受激布里渊散射效应的瞬时微波频率测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 148-154.
- [38] RABBANI Z, GANJALI M, HOSSEINI S E. Microwave photonic IFM receiver with adjustable measurement range based on a dual-out-

- put sagnac loop[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(1): 106-112.
- [39] BUI L A, 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.
- [40] EMAMI H, HAJIHASHEMI M, ALAVI S E, et al. Microwave photonics instantaneous frequency measurement receiver based on a sagnac loop[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2233.
- [41] 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.
- [42] EMAMI H, SARKHOSH N, BUI L A, et al. Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13707.
- [43] Emani H, Sarkhosh N, Bui L, et al. Amplitude independent instantaneous frequency measurement using all optical technique[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29601-29611.
- [44] SHEN Z Q, JIN C F, HE Q S, et al. Photonics-assisted non-scanning high-accuracy frequency measurement using low-speed components[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-8.
- [45] 刘可欣,高娜. 基于非均匀光频梳的多频率瞬时信号检测方案[J]. *光学学报*, 2022, 42(23): 2306004.
- [46] 蒋玉政,李晶,周伟,等. 基于锯齿波调制非平坦光频梳的信道化多频测量[J]. *光学学报*, 2023, 43(22): 2206001.
- [47] SHI J Z, ZHANG F Z, BEN D, et al. Photonics-based broadband microwave instantaneous frequency measurement by frequency-to-phase-slope mapping[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(2): 544-552.
- [48] WANG D, DU C, YANG Y C, et al. Wide-range, high-accuracy multiple microwave frequency measurement by frequency-to-phase-slope mapping[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105895.
- [49] WANG D, ZHANG X D, LIU S, et al. Photonic-assisted microwave frequency measurement with adjustable channel bandwidth based on spectrum-controlled brillouin phase shift[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(6): 1-5.
- [50] HUANG C, CHAN E H W. Microwave frequency measurement based on a frequency-to-phase mapping technique[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(22): 5957.
- [51] WANG S T, WU G L, SUN Y W, et al. Photonic compressive receiver for multiple microwave frequency measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25364.
- [52] YE C H, FU H Y, ZHU K, et al. All-optical approach to microwave frequency measurement with large spectral range and high accuracy[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 614-616.
- [53] 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.
- [54] XIAO Y C, GUO J, WU K, et al. Multiple microwave frequencies measurement based on stimulated Brillouin scattering with improved measurement range[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 31740.
- [55] JIAO W T, YOU K, SUN J Q. Multiple microwave frequency measurement with improved resolution based on stimulated brillouin scattering and nonlinear fitting[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-12.
- [56] 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.
- [57] JIAO W T, HUANG Q, HUANG C K, et al. High-precision microwave frequency measurement based on stimulated brillouin scattering with simple configuration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4562-4570.
- [58] WANG D, ZHANG X D, ZHAO X Q, et al. Photonic microwave frequency measurement with improved resolution based on bandwidth-reduced stimulated Brillouin scattering[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102803.
- [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.
- [60] ZUO P C, MA D, LIU Q B, et al. Photonics-assisted microwave pulse detection and frequency measurement based on pulse replication and frequency-to-time mapping[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(7): 1639.
- [61] HAO T F, TANG J, LI W, et al. Microwave photonics frequency-to-time mapping based on a Fourier domain mode locked optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33582.
- [62] HAO T F, TANG J, SHI N N, et al. Multiple-frequency measurement based on a Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator operating around oscillation threshold[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 3062.
- [63] ZUO P C, MA D, CHEN Y. Short-time fourier transform based on stimulated brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5052-5061.
- [64] ZUO P C, MA D, CHEN Y. Photonics-based short-time fourier transform without high-frequency electronic devices and equipment[J].

- IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(2): 109-112.
- [65] ZUO P C, MA D, LI X W, et al. Improving the accuracy and resolution of filter-and frequency-to-time mapping-based time and frequency acquisition methods by broadening the filter bandwidth[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(8): 3668-3677.
- [66] DONG W H, CHEN X Y, CAO X H, et al. Compact photonics-assisted short-time fourier transform for real-time spectral analysis[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(1): 194-200.
- [67] 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.
- [68] LI R Y, CHEN H W, LEI C, et al. Optical serial coherent analyzer of radio-frequency (OSCAR)[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13579.
- [69] CHEN H W, LI R Y, LEI C, et al. Photonics-assisted serial channelized radio-frequency measurement system with nyquist-bandwidth detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 1-7.
- [70] HAO W, DAI Y, YIN F, et al. Chirped-pulse-based broadband RF channelization implemented by a mode-locked laser and dispersion [J]. Optics Letters, 2017, 42(24): 5234.
- [71] Fred Allan Volkening B M. Photonic Channelized RF receiver employing dense wavelength division multiplexing: US10647527[P]. 2007-07-17.
- [72] BRÈS C, ZLATANOVIC S, WIBERG A O J, et al. Reconfigurable parametric channelized receiver for instantaneous spectral analysis [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3531.
- [73] HUANG H, ZHANG C F, ZHOU H, et al. Double-efficiency photonic channelization enabling optical carrier power suppression[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4073.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] XU W Y, ZHU D, PAN S L. Coherent photonic radio frequency channelization based on dual coherent optical frequency combs and stimulated Brillouin scattering[J]. Optical Engineering, 2016, 55(4): 46106.
- [77] SHEN J, WU S B, LI D, et al. Microwave multi-frequency measurement based on an optical frequency comb and a photonic channelized receiver[J]. Applied Optics, 2019, 58(29): 8101.
- [78] 安康, 张先玉, 梁涛. 双光频梳辅助的微波频率测量方法[J]. 微波学报, 2023, 39(1): 19-24.
- [79] LI Y H, KUSE N, FERMAN M. Fast ultra-wideband microwave spectral scanning utilizing photonic wavelength-and time-division multiplexing[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18863.
- [80] LI Y H, KUSE N, FERMAN M. Photonics-enabled wideband microwave burst detection[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1491.
- [81] JIANG W, ZHAO S H, TAN Q G, et al. Wideband photonic microwave channelization and image-reject down-conversion[J]. Optics Communications, 2019, 445: 41-49.
- [82] LU X K, PAN W, ZOU X H, et al. Wideband and ambiguous-free RF channelizer assisted jointly by spacing and profile of optical frequency comb[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1-11.
- [83] 刘可欣, 高娜. 基于受激布里渊散射的光子辅助瞬时测频方案[J]. 光学学报, 2022, 51(3): 306008.
- [84] BUCKLEY B W, MADNI A M, JALALI B. Coherent time-stretch transformation for real-time capture of wideband signals[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21618.
- [85] GUO Q, LIANG Y, CHEN M, et al. Compressive spectrum sensing of radar pulses based on photonic techniques[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4517.

(责任编辑:赵海军)