

高精度微波光子频率测量技术研究

黄桂霞,李浩楠,李响,范志强,王云祥,邱琪*

(电子科技大学,成都 611731)

摘要:微波光子频率测量技术具备快速响应、大带宽和强抗干扰等优势。设计了一种基于频率-时间映射的高精度微波光子频率测量系统,系统主要包括线性调频(LFM)激光光源、微波信号强度调制光路、相干拍频与信号检测以及信号处理等模块。通过将待测信号与 LFM 光源进行外差拍频,实现频率到时间的精确映射,从而获取微波频率信息。分析了调谐速率、光源线性度、线宽及滤波器带宽等关键参数对测量精度的影响。研究表明:在光源线宽为 0.1 MHz、调谐速率为 1 GHz/ μ s、线性度为 1×10^{-5} 的条件下,系统在 2~18 GHz 频率范围内测量精度可达 0.26 MHz。

关键词:微波光子;频率-时间映射;高精度;频率测量;外差相干

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)06-0099-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.017

Research on high-precision frequency measurement technology based on microwave photonics

HUANG Guixia, LI Haonan, LI Xiang, FAN Zhiqiang, WANG Yunxiang, QIU Qi*

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Microwave photonic frequency measurement technology offers advantages such as fast response, large bandwidth, and strong anti-interference capability. A high-precision microwave photonic frequency measurement system based on frequency-to-time mapping was designed. The system primarily consists of modules such as a linearly frequency-modulated (LFM) laser source, an optical path for microwave signal intensity modulation, coherent beating and signal detection, and signal processing. By performing heterodyne beating between the signal under test and the LFM light source, precise frequency-to-time mapping is achieved, thereby obtaining microwave frequency information. The impacts of key parameters such as tuning rate, source linearity, linewidth, and filter bandwidth on measurement accuracy were analyzed. The research results indicate that under the conditions of a light source linewidth of 0.1 MHz, a tuning rate of 1 GHz/ μ s, and a linearity of 1×10^{-5} , the system achieves a measurement accuracy of up to 0.26 MHz within the frequency range of 2 GHz to 18 GHz.

Key words: microwave photonics, frequency-to-time mapping, high precision, frequency measurement, heterodyne coherence

0 引言

在电子对抗、雷达、无线通信、交通车辆控制等多个领域中,对复杂电磁环境下快速准确测量微波信号

收稿日期:2025-01-08。

基金项目:四川省自然科学基金(2023NSFSC1379)资助;四川省自然科学基金(2023NSFSC0448)资助;中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放基金(KLLDT202409)资助。

作者简介:黄桂霞(1999—),女,福建南平人,硕士研究生,现就读于电子科技大学光电科学与工程学院光学工程专业,主要研究方向为微波光子频率测量,聚焦于基于线性调频光源的频率测量精度研究。

*通信作者:邱琪(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤通信技术与微波光子技术。



频率的需求日益迫切^[1-2]。然而,传统电子测频技术测量带宽较小、速度较慢,且易受电磁干扰影响^[3],难以满足当前的实际应用需要。与之相比,微波光子频率测量技术具备快速响应、大带宽、高分辨率和抗电磁干扰等突出优点^[4]。目前,这类技术按其测量原理主要分为频率-空间映射、频率-功率映射和频率-时间映射等三大类技术。

基于频率-空间映射的技术通过将待测微波信号调制到光波上,利用光学装置将不同频率的信号映射到不同的空间通道中,从而实现频率的实时测量。常见的频率-空间映射元件包括光栅、波分复用器和阵列光学滤波器等,这类系统结构通常较为复杂、成本

黄桂霞,李浩楠,李响,等:高精度微波光子频率测量技术研究

较高,且测量精度有限。例如,基于空间衍射光栅的光学信道化器,其信道间隔通常仅能达到1 GHz^[5]。为提升测量精度,学者们提出了基于光频梳的信道化微波光子频率测量方案^[6-8],最高可实现±50 MHz的频率精度。

基于频率-功率映射的微波光子测频技术利用光功率随频率变化的特定衰减响应构建幅度比较函数(ACF),实现微波频率到输出光功率的映射。该技术结构简单、易于实现,但通常无法同时识别多个频率信号,且存在测量范围有限、精度较低等不足。在相关研究中,通过扫描激光源连续调谐光载波与光学谐振频率之间的相对频率差以构建ACF,实现了平均47.2 MHz的测量精度^[9];采用非切片宽带光源^[10]和1×4马赫-曾德尔(MZM)干涉仪结构的频率-功率映射方案^[11],分别实现了110 MHz和100 MHz以内的测量精度。此外,与单一ACF方案相比,使用双ACF结构可在设定范围内更准确地确定射频信号频率^[12],其精度由±270 MHz降低至±150 MHz。

基于频率-时间映射的微波光子测频技术是近年来的研究热点,其特点是结构简单、能同时测量多个频率,并具有响应快、测量范围大、精度高的优势。该技术将待测微波信号调制到光波上,利用介质色散、窄带滤波器或扫描光源相干拍频等方式,把未知的频率信息映射到时域中,再通过测量时间参数反推得到微波频率。目前,基于集成环形谐振器^[13]、双偏振双驱

动MZM^[14]以及超高品质因子混合光滤波器^[15]的频率测量方案,已分别实现0.4、3、5.6 MHz的测量精度;而采用光边带扫描^[16]与信号光拍频的频率-时间映射方案,其平均测量精度可低至7.53 MHz,但系统复杂度和成本也相应增加。

综上所述,实现一种兼具高精度与结构简洁性的测量方案已成为迫切需求。然而,现有研究大多缺乏对影响测量精度关键因素的系统性分析。因此,本文设计一种基于频率-时间映射的高精度微波光子频率测量系统,深入探究影响精度的主要因素,并总结出实现高精度测量所需的技术参数条件。

1 系统原理

基于频率-时间映射的高精度微波频率测量系统结构原理图如图1所示。该结构由连续激光器(CW-LD)、MZM、线性调频光源(LFM-OS)、保偏耦合器(PM-OC)、光电探测器(PD)、带通滤波器(BPF)以及数字信号处理(DSP)部分组成,将频率映射到时间参数实现未知信号频率测量。

由图1可知,下支路为LFM-OS,扫描范围从最低频率 ν_{\min} 扫描到最高频率 ν_{\max} 。该线性扫频特性如图中A点插图所示,频率呈线性变化。其中, $\nu_{\min} = \nu_c - f_m$, $\nu_{\max} = \nu_c + f_m$, ν_c 为中心频率, f_m 为半宽频率,理想的LFM函数可表示为

$$\nu_s(t) = \nu_{\min} + kt \quad (1)$$

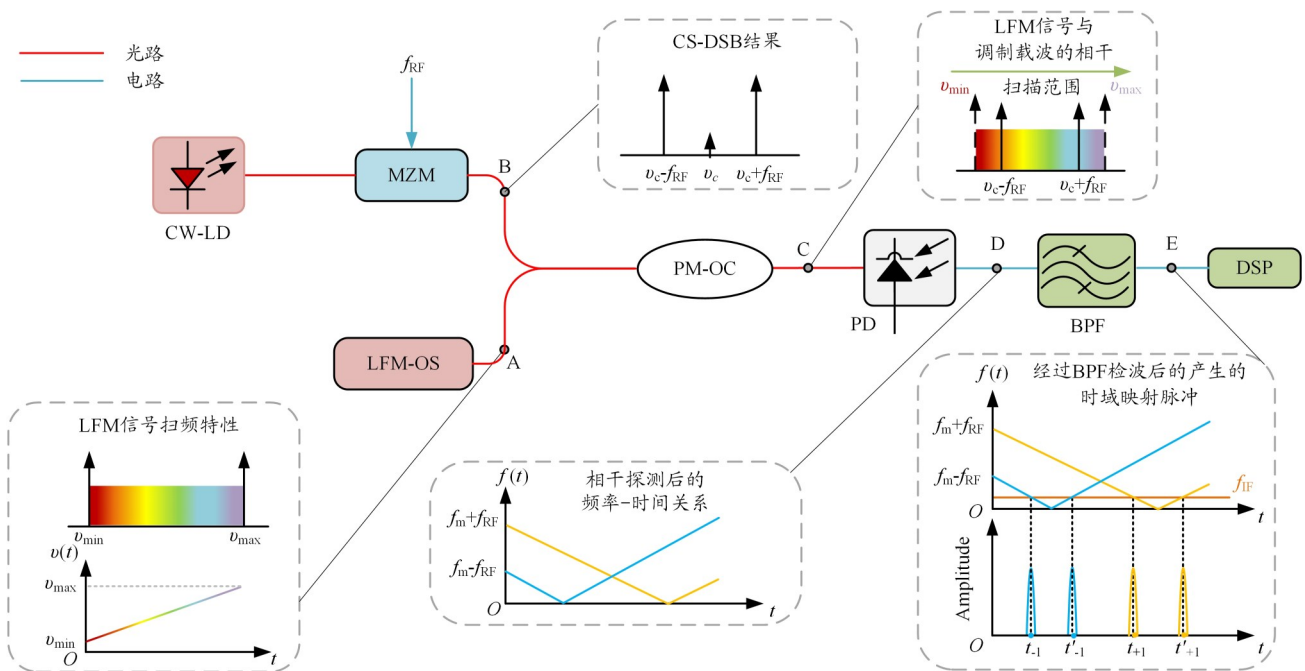


图1 基于频率-时间映射的高精度微波频率测量系统原理图

式中: v_s 为LFM-OS的频率, k 为LFM-OS的调谐速率, t 为扫描时间。

图1中,上支路为CW-LD,用于产生中心频率 v_c 的光载波。该载波通过MZM对微波信号频率 f_{RF} 进行载波抑制双边带调制(CS-DSB),其调制结果如图1中B点插图所示。其中心载波被抑制,在 v_c+f_{RF} 和 v_c-f_{RF} 处分别产生2个对称的边带。该支路信号与下支路输出的扫频光信号在PM-OC处进行相干,其相干作用过程对应图1中C处插图。LFM信号依次扫描正负一阶边带信号,经过PD产生拍频信号如式(2)所示。

$$I_{PD}(t) \propto \{E_s^2 + 2E_c^2 + 2E_s E_c \cos[2\pi(v_s - v_c - f_{RF})t] + 2E_s E_c \cos[2\pi(v_s - v_c - f_{RF})t] + 2E_c^2 \cos[2\pi(2f_{RF})t]\} \quad (2)$$

式中: E_c 为光载波信号幅度, E_s 为LFM信号的幅度。

输出的光电流中的频率成分随时间变化趋势如图1中D点插图所示,其中产生2个拍频信号。最终,拍频信号经过中心频率为 f_{RF} 的带通滤波器,完成频率到时间的映射,从而得到4个时间脉冲信号,其波形如图1中E点插图所示。其中,时间间隔 τ 可表示为

$$\tau = t'_{+1} - t'_{-1} = t_{+1} - t_{-1} \quad (3)$$

式中: $t_{-1}, t'_{-1}, t_{+1}, t'_{+1}$ 分别是4个时域脉冲信号出现的时刻,因此可得到未知微波信号的频率为

$$f_{RF} = k\tau/2 \quad (4)$$

该测频方案基于LFM激光光源与微波调制光信号之间的相干外差拍频原理,实现了频率测量。系统采用载波抑制双边带调制,并通过时间差分法有效消除光源波长漂移引入的误差。最终,信号经带通滤波与检波处理,完成从频率到时间的映射,进而精确解算出被测微波信号的频率值。

2 影响测频精度的关键因素

在本文提出的频率测量系统中,影响测频精度的关键因素包括LFM-OS的线性度、光源线宽、调谐速率、中频与BPF带宽等。

2.1 线性度

线性度是衡量LFM-OS产生调频信号的频率-时间关系的线性程度,定义为扫频范围内的满足线性关系的理想频率与实际频率之间的最大偏移 Δv_{\max} 和频率范围的比值,其线性度表达式为

$$\gamma = \frac{\Delta v_{\max}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (5)$$

由时间间隔 τ 引起的误差为时间误差 $\Delta\tau$,将式

(4)改写为

$$f_{RF} = k(1 + \gamma)(\tau + \Delta\tau)/2 \quad (6)$$

忽略式(6)中 $k\gamma\Delta\tau$ 极小项的影响,则测量精度 Δf_{RF} 可表示为

$$\Delta f_{RF} = (k\gamma\tau + k\Delta\tau)/2 \quad (7)$$

由式(7)可知, $k\gamma$ 为LFM-OS的线性度所引入的误差,其线性度的大小直接影响了测量精度中系统的误差大小。同时,时间误差 $\Delta\tau$ 受光源线宽、BPF带宽等因素的影响,进而对测量精度产生影响。

此时,仅考虑LFM的线性度引入的误差,并认为时间间隔测量准确无误。为此,在分析由LFM-OS系统线性度不理想所导致的误差时,可将式(7)简化为

$$\Delta f_{RF} \approx k\gamma\tau/2 \quad (8)$$

在待测频率为10 GHz的条件下,评估了不同调谐速率 α (0.1、1、10 GHz/ μ s)与不同线性度(1×10^{-3} 、 1×10^{-4} 、 1×10^{-5})对测量精度的影响,结果如图2所示。当 α 为1 GHz/ μ s时,根据式(4)得到 τ 值为20 μ s,计算出不同线性度对应的测量误差分别为10、1、0.1 MHz;当 α 为0.1 GHz/ μ s和10 GHz/ μ s时,测量精度与上述情况相同。由此可知,该测量方案的测量精度与LFM光信号的线性度成正比关系,与调谐速率无关。

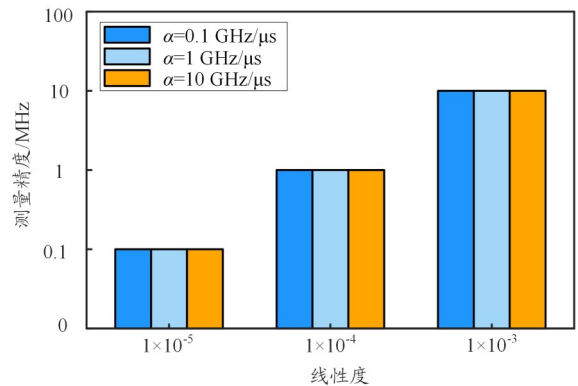


图2 线性度与调谐速率 α 对测量精度的影响

2.2 光源线宽

探究LFM-OS与CW-LD线宽对频率测量精度的影响时,可忽略线性度 γ 带来的误差,将式(7)改写为

$$\Delta f_{RF} \approx k\Delta\tau/2 \quad (9)$$

$\Delta\tau$ 表达式为

$$\Delta\tau = \frac{\Delta v}{k} \quad (10)$$

式中: Δv 为光源线宽相干拍频后中频频谱展宽。

为研究LFM-OS与CW-LD在不同线宽配置下的性能,本文在Optisystem中搭建了中频为1 GHz的外差

黄桂霞,李浩楠,李响,等:高精度微波光子频率测量技术研究

相干拍频仿真模型。当CW-LD的中心频率与LFM-OS的实时扫描频率相差1 GHz时,两光源相干探测后得到的频谱展宽结果如图3所示。测得中频频谱的3 dB带宽分别为0.15、1.13、1.39 MHz,对应系统调谐速率为1 GHz/ μ s。根据式(10)可计算得到对应的时间误差 $\Delta\tau$ 为0.15、1.13、1.39 ns。进一步利用式(9)计算得到相应的频率测量精度分别为0.08、0.57、0.70 MHz。

由图3可知,随着LFM-OS与CW-LD线宽的增加,相干拍频后中频信号的3 dB带宽呈现明显展宽趋势。因此,在系统设计时,为降低光谱展宽对测量精度的影响,应优先选用窄线宽光源,并尽量保持LFM-OS与CW-LD的线宽相匹配,以提升整体系统的频率测量精度。

2.3 调谐速率、中频与滤波器带宽

根据微波信号的频率范围,外差中频频率 f_{IF} 的选取需满足:

$$f_{IF} < f_m - f_{RF} \quad (11)$$

此条件确保中频滤波器的中心频率与拍频信号匹配,同时确保该滤波器带宽应至少能够通过1个周期的中频信号,从而准确判断时间间隔。

滤波器带宽与调谐速率 α 及中频频率 f_{IF} 之间的关系如图4所示。可以看出,选取的滤波器带宽随 α 的增大而相应展宽。在相同 α 下,滤波器带宽随 f_{IF} 的增大相应展宽。因此,为确保最佳测量精度,在满足系统响应速度要求的前提下,应优先选择较低的调谐速率和较小的中频设置。

3 性能分析与实验验证

为了实现对2~18 GHz微波信号的频率测量,系统将中频设置为1 GHz。在CS-DSB下,若要探测最高

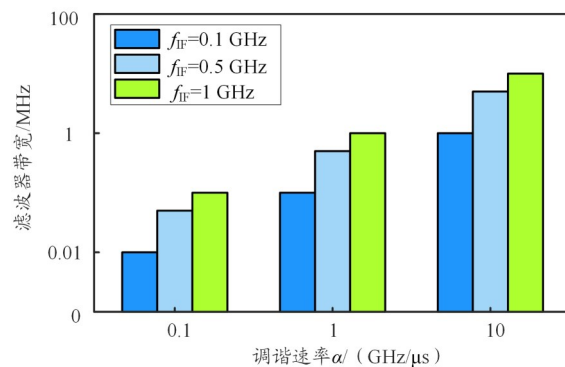
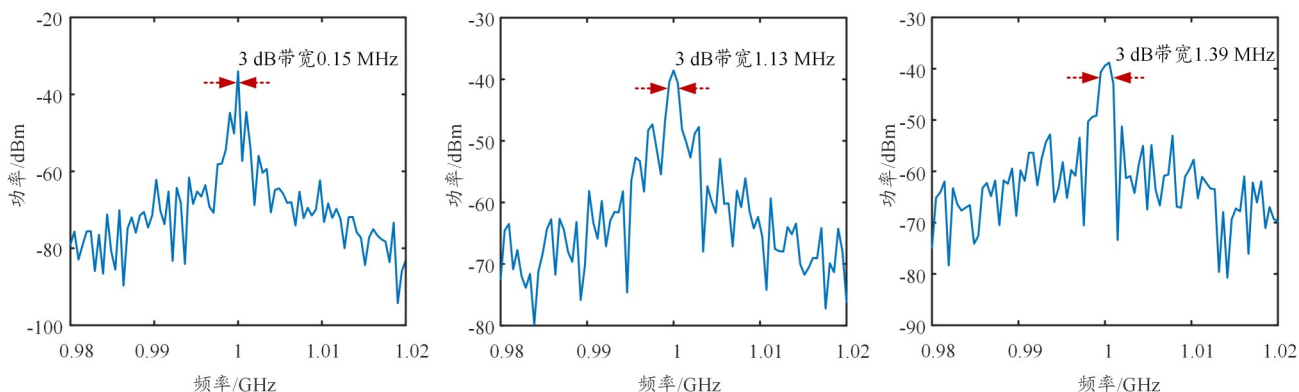


图4 滤波器带宽与调谐速率 α 及中频频率 f_{IF} 之间的关系

18 GHz的未知信号,LFM-OS需要扫描至与调制光的一阶边带(± 19 GHz)进行拍频。因此,LFM-OS的扫描范围需以光载波为中心,覆盖38 GHz带宽。当LFM-OS与CW-LD的线宽均为0.1 MHz,且LFM-OS调谐速率为1 GHz/ μ s时,可推算出BPF所需的最小带宽为1 MHz。

LFM-OS的线性度与光源线宽对系统测量精度的影响,如图5所示(纵坐标为对数坐标)。可以看出,在光源线宽一定的情况下,提高线性度可显著降低测量误差,即测量精度提高。尤其对于0.1 MHz的窄线宽光源,线性度提升对误差的改善效果比1 MHz线宽光源更为明显。此外,LFM-OS的调谐速率不影响测量精度。基于以上性能,在最小频率2 GHz处,当LFM-OS与CW-LD线宽均为0.1 MHz、线性度为 1×10^{-5} 时,计算出测量精度可达0.1 MHz;在最大频率18 GHz处,测量精度为0.26 MHz。

本文已基于该方案开展实验验证^[17],在2 GHz频点处测得的22.23 MHz精度与理论值30.38 MHz吻合良好,验证了本测频方案的可行性。



(a) LFM-OS与CW-LD的线宽均为0.1 MHz (b) LFM-OS线宽为0.1 MHz,CW-LD线宽为1 MHz (c) LFM-OS与CW-LD的线宽均为1 MHz

图3 中频为1 GHz时双光源的相干探测频谱展宽

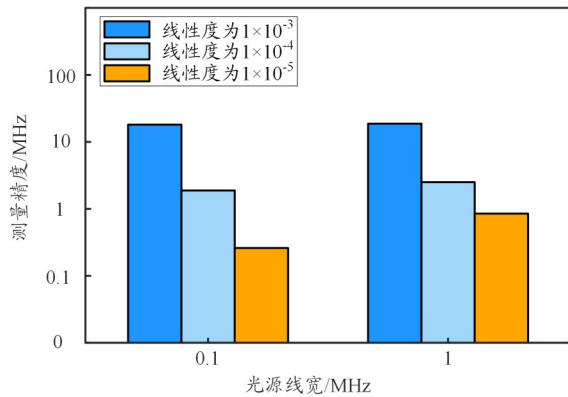


图5 LFM-OS线性度和线宽对测量精度的影响

4 结束语

本文设计了一种基于频率-时间映射的高精度微波频率测量系统,并通过分析关键影响因素全面评估其测频精度。该系统利用LFM-OS的外差相干将频率信息映射至时间域,采用CS-DSB,结合时间差分频率计算方法,有效抑制了LFM-OS波长漂移的影响,从而提高了测量精度。分析结果表明,LFM-OS的线性度与测量精度呈正相关,选用窄线宽光源与最小带宽中频滤波器有助于进一步提升系统性能,且LFM-OS的调谐速率不影响测量精度。在LFM-OS与CW-LD线宽均为0.1 MHz、LFM-OS调谐速率为1 GHz/ms、线性度为 1×10^{-5} 的条件下,对于10 GHz待测信号,测量精度小于0.18 MHz;在2~18 GHz频率范围内,系统测量精度可达0.26 MHz。综上所述,该方案为高精度微波频率测量提供了新的可行途径。

参考文献:

[1] Capmany J, Munoz P. Integrated microwave photonics for radio access networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(16): 2849-2861.
 [2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319.
 [3] Pan S, Yao J. Photonics-based broadband microwave measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 35(16): 3498-3513.
 [4] Zou X, Lu B, Pan W, et al. Photonics for microwave measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(5): 711-734.
 [5] Wang W, Davis R L, Jung T J, et al. Characterization of a coherent op-

tical RF channelizer based on a diffraction grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1996-2001.

[6] Wei Y, Wang X, Miao Y, et al. Measurement and analysis of instantaneous microwave frequency based on an optical frequency comb[J]. Applied Optics, 2022, 61(23): 6834-6840.

[7] Li J, Xu P, Song K, et al. Research on channelized receiver based on microwave photonic with large instantaneous bandwidth[C]//The 7th Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing(APCOM and YSAOM 2021), October 28-31, 2021, Shanghai, China. Shanghai: SPIE, 2022, 12166: 166-177.

[8] Wang X, Miao Y, Chen J, et al. High-resolution microwave frequency measurement based on optical frequency comb and image rejection photonics channelized receiver[C]//2022 IEEE 7th Optoelectronics Global Conference(OGC), December 6-11, 2022, Shenzhen, China. Shenzhen: IEEE, 2022: 30-35.

[9] Song S, 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.

[10] Shi D, Wen J, Zhu S, et al. Instantaneous microwave frequency measurement based on non-sliced broadband optical source[J]. Optics Communications, 2020, 458: 124758.

[11] Wang G, Li X, Meng Q, et al. Instantaneous frequency measurement with full FSR range and optimized estimation error[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(18): 6123-6130.

[12] Chen H, Huang C, Chan E H W. Photonics-based instantaneous microwave frequency measurement system with improved resolution and robust performance[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(6): 1-8.

[13] Singh K, Preußler S, Misra A, et al. Photonic microwave frequency measurement with high accuracy and sub-MHz resolution[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2748-2753.

[14] Wang L, Hao T, Guan M, et al. Compact multi-tone microwave photonic frequency measurement based on a single modulator and frequency-to-time mapping[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(19): 6517-6522.

[15] Zhang W, Liu H, Cheng Y, et al. High-resolution photonic-assisted microwave frequency identification based on an ultrahigh-Q hybrid optical filter[J]. Optics Express, 2023, 31(25): 42651-42666.

[16] Wang G, Meng Q, Li Y J, et al. Photonic-assisted multiple microwave frequency measurement with improved robustness[J]. Optics Letters, 2023, 48(5): 1172-1175.

[17] Li X, Fan Z, Su J, et al. Photonic-assisted wideband microwave frequency measurement based on optical heterodyne detection[J]. Optics Express, 2024, 32(10): 18127-18138.