

·测试、试验与仿真·

微波光子辅助的瞬时频率测量技术研究进展

李月琴,裴丽,宁提纲,王一群,袁瑾,李晶

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

摘要:微波光子辅助的瞬时频率测量(IFM)系统具有高时间带宽积、低功率损耗、轻系统质量以及抗电磁干扰等巨大优势。对目前国内外研究的IFM系统按照频率-空间、频率-时间和频率-幅度三种映射方式进行分类介绍,主要归纳比较了具有频率-幅度映射关系的IFM系统,针对其中存在的测量范围和测量精度之间的互换(Trade-off)问题,进一步引申到研究高精度可调谐测量范围的IFM技术,并对目前相关领域的研究进行了追踪报道。

关键词:瞬时频率测量;微波光子;频率-幅度映射

中图分类号:TN914.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-04-0076-05

Research Progress in Microwave Photonic-assisted Instantaneous Frequency Measurement Technology

LI Yue-qin, PEI Li, NING Ti-gang, WANG Yi-qun, YUAN Jin, LI Jing

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Microwave photonic-assisted instantaneous frequency measurement (IFM) system has many advantages such as high time-bandwidth product, low power consumption, light weight and anti-electromagnetic interference. Domestic and foreign IFM systems are introduced respectively according to three kinds of mapping modes such as frequency-space, frequency-time and frequency-amplitude. And IFM system with frequency-amplitude mapping relationship is mainly concluded and compared. According to the trade-off problem between measurement range and accuracy, IFM researching technology with high accuracy and tunable measurement range is further presented. And the current researches in the fields are reported.

Key words: instantaneous frequency measurement; microwave photonic; frequency-amplitude mapping

瞬时频率测量(IFM, instantaneous frequency measurement)技术是指在脉冲持续的短周期内对被测信号的频率进行快速测量^[1]。针对IFM技术的研究,早期以电子学方法为主,然而,随着测量要求的提高,“电子瓶颈”以及电磁干扰问题阻碍了该技术的发展,因此,在研究中引入了微波光子学。微波光子辅助的IFM系统相比传统电子学方法具有其独特优势:(1)测量范围受带宽限制较小,可实现小型化超宽带微波信号的分析 and 检测;(2)抗电磁干扰特性能够提高测量的隐秘性,有效保护测量系统。目前提出的微波光子辅助的IFM系统按映射

方式可大致划分为频率-空间、频率-时间和频率-幅度三类映射。主要对基于频率-幅度映射的IFM系统进行分类比较,并进一步引申到高精度可调谐测量范围的IFM技术研究,重点总结了一种单光源无滤波结构的IFM新方案。

1 IFM系统的分类与技术要点

1.1 频率-空间映射

频率-空间映射方案是利用光载波通过一些不

收稿日期:2014-06-20

基金项目:国家自然科学基金(61275076)资助课题

作者简介:李月琴(1989-),女,广西北海人,博士,主要研究方向为微波光子、RoF等。

同的特殊光学通道来获得微波信号频率的方法。它引入较早,并且在2000年后有了更大发展。其中,基于高分辨率的自由空间衍射光栅的方法^[2],瞬时带宽可以超过100 GHz,信道间隔为1 GHz。而2006年提出的基于集成布拉格光栅和菲涅耳透镜的系统^[3]中,在连续波上调制的微波信号被光栅法布里-珀罗(BGFP)空间分割,可以达到2 GHz精度。然而,基于该原理的IFM实现手段普遍存在测量范围小和精度低的问题。

1.2 频率-时间映射

频率-时间映射方案是通过测量时间参数,即微波信号被调制后得到光载波,利用其两个边带在经过一段色散介质后所产生的时延差大小来获得微波信号频率。2009年,Linh V. T. Nguyen提出的方案^[4]中,同时输入的信号利用色散介质可以得到一系列不同的时延。这类方案的优点是不同频率分量可以同时测量,但是过低的测量精度和昂贵成本带来很大的局限性。

1.3 频率-幅度映射

频率-幅度映射方案是通过引入幅度比较函数(ACF, amplitude comparison function)并对其进行分析得到微波信号频率。由于它具有在较宽频带范围内实现高精度测量等优点,因此可以有效实现IFM。

2 基于频率-幅度映射的IFM实现方案

2009年2月,澳大利亚学者M Attygalle等人提出一种利用短色散介质的IFM系统^[5]。如图1所示。将待测微波信号等分为两路,其中一路与本振信号混频。这两路不同频率的信号先分别进行强度调制,再经由色散元件和滤波,由探测器判定得到互补功率响应函数。随着测量范围增大,所需色散介质长度大大减小。当调制带有啁啾时,长度可以更小。该系统通过实验验证得到测量范围为4~19 GHz。

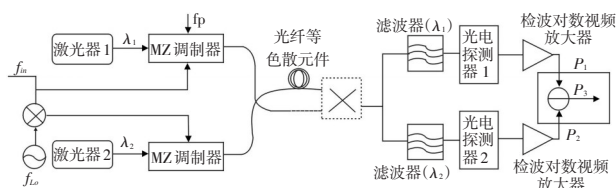


图1 利用短色散介质的IFM系统^[5]

2009年3月,北京邮电大学的李建强博士提出了利用双输出MZM产生的啁啾调制来实现频率范围可调的IFM方案^[6]。如图2所示。MZM的一个射频端口加载待测微波信号,另一个端口不使用,信号在MZM中进行啁啾调制,光源采用可调激光源。该实验对三种波长分别实现了不同的测量范围:1 580 nm波长对应9 GHz的测量范围;1 520 nm波长对应10.5 GHz的测量范围;1 460 nm波长对应12.7 GHz的测量范围。

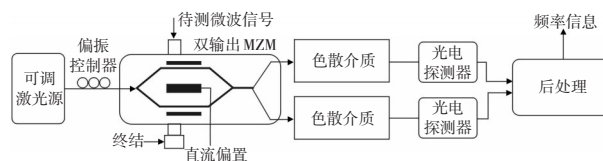


图2 基于双输出MZM的IFM方案^[6]

同年6月,浙江大学的章晓敏则提出了一个利用相位调制器的方案^[7],如图3所示。待测微波信号直接加载到相位调制器上,光波通过复用器后进行的是相位调制,传输后由解复用器分成两路进行光检测。由于两个载波色散系数不同,所以检测到的两路微波功率不同,利用功率差进行测量频率。该实验中,波长选择的不同可以实现不同的精度和测量范围,比如当波长选择在 λ_1 为1 520 nm, λ_2 为1 620 nm的情况下,可以达到 ± 0.5 GHz的精度和7.3~15.05 GHz的测量范围或者 ± 0.1 GHz的精度和11.0~15.0 GHz的测量范围;而在 λ_1 为1 520 nm, λ_2 为1 540 nm时,并且精度也为 ± 0.5 GHz的控制条件下,测量范围可以扩大到11.75~17.95 GHz。

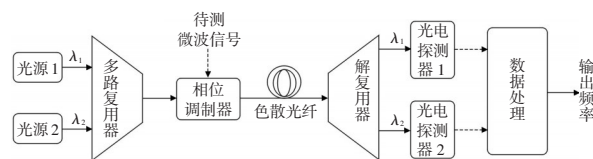
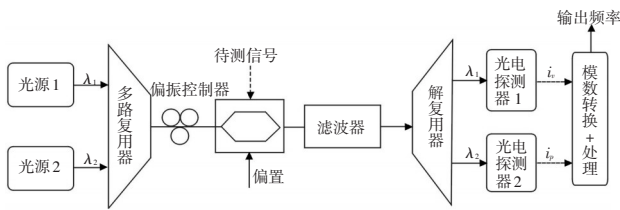


图3 利用相位调制器的IFM方案^[7]

2008年7月,浙江大学的池灏等人提出了一种基于正弦滤波器的IFM方案^[8]。如图4所示。该方案的最大特点是把色散元件替换为具有正弦光谱响应的滤波器。光载波波长分别对应正弦谱响应的最高峰和最低谷位置,微波通过光载波抑制方式调制到光上后得到的两个光载波输出的光功率具有正交特性。该系统实现了0~20 GHz的测量范围,误差限制在 ± 0.2 GHz以内。

图4 基于正弦光滤波器的IFM方案^[8]

2011年8月,北京邮电大学的戴键提出了一种利用共享的MZI的方案^[9]。如图5所示。这个结构中,ACF与输入微波频率有关但是独立于光功率和调制指数。强度调制和相位调制引起的低通到带通响应之比得到ACF。该方案实现了 ± 0.2 GHz的测量精度以及5~10 GHz的测量范围。

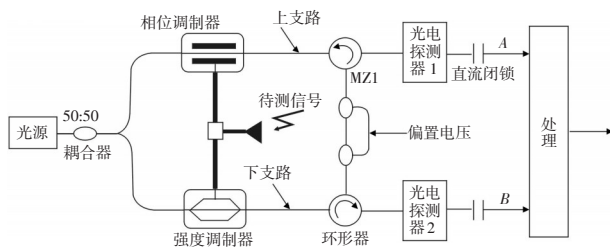
图5 基于共享的MZI的IFM方案^[9]

表1是对这些方案优缺点进行的归纳对比。

表1 方案优缺点比较^[5-9]

IFM方案	优点	缺点
利用短色散介质 ^[5]	测量范围大且小色散时精度高;光纤能消除对群时延的敏感性	额外增加的本振增加系统成本
基于双输出MZM ^[6]	采用单光源,避免了波长复用器和解复用器的使用;精度高	调节激光器波长耗时长;目前要用普通MZM模拟双输出MZM
利用相位调制器 ^[7]	相位调制器消除偏置漂移且系统简单,插入损耗小	RF功率差小,功率比分布曲线在低频范围平坦,测量误差大
基于正弦滤波器 ^[8]	采用低频元件(只有MZM一个微波元件),简单成本低	需要精细控制来得到稳定光功率和波长
基于共享的MZI ^[9]	对外界的敏感程度减弱;响应速度快;功率波动不影响准确度	调制器构造难,半波电压影响大;对向传输影响需验证;噪声误差

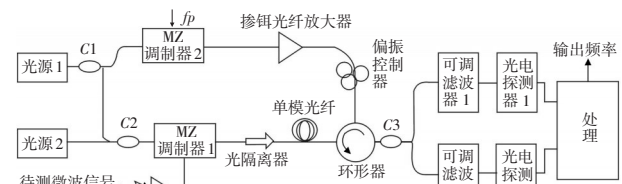
对比发现,方案^[5-7]都基于色散介质,调节范围不大,并且多数要改变光源输出波长来调节,反应时间长还要克服波长漂移或抖动对测量结果的影响。相对这类方案,方案^[8-9]是利用干涉器件如典型的MZI来构建微波功率衰减函数。它们的延迟干涉响应时间较短,测量范围的改变不受激光器波长的限制,灵活度更大。然而,上述方案都存在统一的

局限性:测量范围和测量精度之间存在互换(Trade-off),即范围越大精度越低、范围越小精度越高,而这些IFM系统的测量范围又是相对固定且测量精度无法控制的,所以不符合当前频率测量技术中对特定频段信号频率的高精度测量需求。

3 高精度可调谐瞬时频率测量技术

为解决上述问题,近几年来国内外学者针对IFM系统的可调测量范围和精度问题展开了广泛研究,提出了重构的IFM系统,向高精度可调谐IFM的研究方向发展。

2012年1月,中国科学院的李蔚等首先提出一个基于受激布里渊散射效应的方案^[10]。如图6所示。方案中,待测微波信号被调制到两个独立的光载波上,MZ调制器1(MZM1)正交偏置得到的DSB调制信号通过标准单模光纤(SMF)后引起两个不同的功率衰减函数,然后通过可调滤波器和光探测器,此时实现窄带调节。如果光源1的部分光功率先通过耦合器C1送到MZ调制器2(MZM2),MZM2偏置在零点得到的载波抑制双边带调制(CS-DSB)信号,经掺铒光纤放大器放大后作为受激SBS的泵浦波,则可以实现宽带调节。在SMF中,CS-DSB信号的上下边带会产生布里渊增益和损耗共振,其深度和光谱形状几乎相同。SBS效应导致ACF可调,从而测量范围可调。该方案可以实现宽带可调的窄测量范围(~ 2 GHz)和高精度(± 0.05 GHz)以及固定的宽测量范围(~ 12 GHz)和普通精度(± 0.25 GHz)两种模式的调节。

图6 基于受激布里渊散射效应的方案^[10]

同年4月,他们又提出了一个基于DPMZM结构的可重构IFM系统方案^[11]。如图7所示。其中的关键器件x-cut集成DPMZM是由一个双平行MZMs和一个双驱动MZM组成的。在MZM1中:未知微波信号馈入,工作在最小传输点,生成CS-DSB;在MZM2中:无驱动信号,工作在最大传输点,OC通过;而MZM3则可以结合前面两者的输出得到CS-DSB+

OC。通过调节 dc 偏置电压 V_3 (改变 CS-DSB 与 OC 信号之间的相位变化 φ), 可以使测量范围调节到任意频率, 且只受限于光发射机和接收机的带宽。该方案实现了 1~12 GHz 的测量范围和 ± 0.1 GHz 的精度。

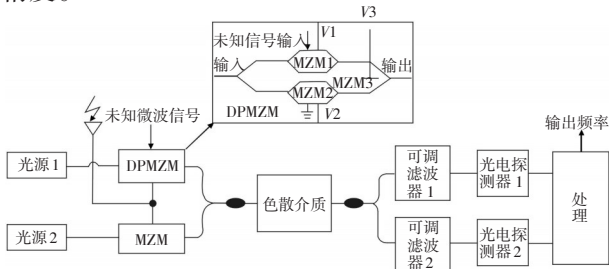


图7 基于DPMZM结构的IFM系统方案^[11]

2013年2月, 南京航空航天大学的张华林和潘时龙提出了利用光偏振调制敏感效应的方案^[12]。如图8所示。通过调节偏振控制器PC来调节范围和分辨率。由于PC1和PC2的作用, 进来的光偏振方向都跟偏振调制器(PolM)主轴成 45° , 而通过调节PC3改变 α , 可以选择最合适的曲线来测量特定频段中的频率, 实现对测量范围的调整及精度的扫描。这个方案可以达到 ± 0.15 GHz的测量精度和3.3~19.7 GHz的测量范围。

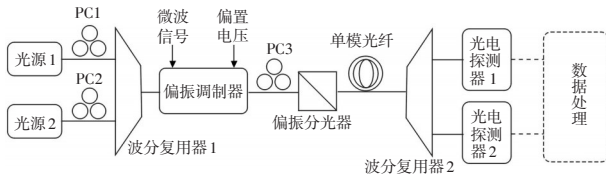
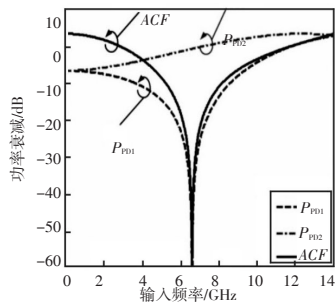


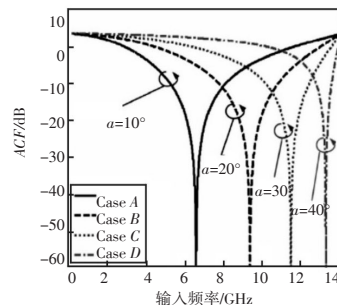
图8 利用光偏振调制敏感效应的方案^[12]

对这三类可调测量范围和精度的方案优缺点进行对比总结如表2。

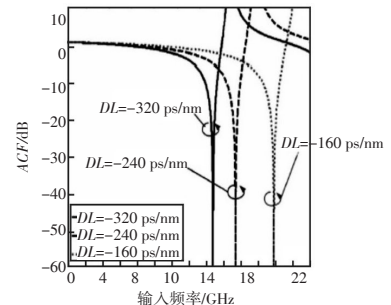
结果表明, 这些方案虽然满足了测量范围和精度的要求, 但仍然存在调制器的偏置电压漂移问



(a) 功率衰减函数和ACF计算结果



(b) DL一定, 改变 α 时对应的ACF



(c) α 一定, 改变DL时的ACF

图10 仿真结果图^[13]

表2 方案优缺点比较^[10-12]

IFM方案	优点	缺点
基于受激布里渊散射效应 ^[10]	调节方便, 两种调节模式。	调制器偏置电压漂移; 噪声误差; 温控要求高。
基于DPMZM结构 ^[11]	调节范围宽; 调节模式可选。	多个干涉型调制器中, 偏置电压漂移是影响方案性能。
利用光偏振调制敏感效应 ^[12]	较大频率范围内得到相对高精度。	稳定性降低, 功率需要动态平衡, 实现复杂。

题以及稳定性不佳, 功率动态平衡实现复杂等问题。因而本研究所的李晶等人在这些研究基础上, 借鉴了利用入射偏振角度来调整IFM系统测量范围的新思路, 提出了一种具有单光源无滤波结构的IFM系统^[13], 系统装置见图9。其基本思想是将光偏振调制和偏振分束原理相结合, 实现同一光波长下且不同光偏振维度上的微波信号加载和分离, 结合色散所致射频功率衰落效应, 可获得频率-幅度的映射关系, 进一步可对所截获的微波信号频率进行精确测量。

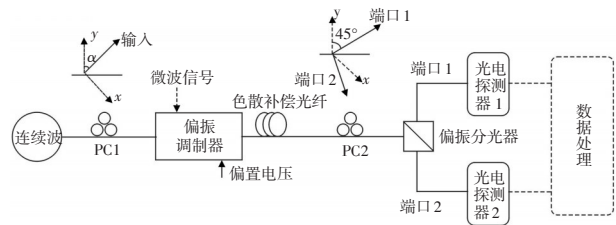


图9 基于单光源无滤波结构的IFM系统^[13]

根据理论推导可得功率衰减函数和ACF计算结果如图10a所示。若在实验中控制色散参数为 $DL = -320$ ps/nm不变, 只改变 α , 可以得到相对应的ACF, 如图10b, 由图可知, 随着 α 的增加, 测量范围增大, 凹陷点分别在6.6 GHz、9.3 GHz、11.4 GHz、13.2 GHz的位置。若控制 α 为 40° 不变, DL 分别设

置在 -320 ps/nm、 -240 ps/nm 和 -160 ps/nm 三个值可以得到对应的 *ACF* 曲线如图 10c。

该方案可以实现 13.2 GHz 的测量范围以及 ± 0.15 GHz 的精度。并且相比之前的研究方案,可最大限度降低 IFM 系统的实现难度,其优点包括:(1)采用单光源,可消除光源功率抖动带来的影响,并且降低复杂程度和成本;(2)无滤波器有助于消除光源中心波长漂移带来的影响,同时也简化了结构;(3)所得幅度比较函数与入射光偏振夹角之间满足严格对应关系,调节该偏振夹角可对频率-幅度映射关系进行相应调整,并实现对测量范围及精度的灵活调节。(4)可实现文献[12]类似的频率测量功能,但其测量范围及精度调谐过程中不需要考虑光功率的动态平衡问题,调节效果更佳。当然该方案也存在缺点如调节偏振角需要非常细致的操作等,但是影响比较小。

4 总 结

瞬时频率测量(IFM)作为一项关键的测量技术,受到了国内外研究人员的关注。其中,对于测量范围及精度的可调性研究方案也在快速地推陈出新,极大地推动了微波光子学应用领域的发展。文中对目前发展最快并且优势也最突出的基于频率-幅度映射的 IFM 系统进行归纳总结。内容上涵盖了一般描述和推进比较,既有对各个典型方案突出特点的描述和各个方案优缺点的对比总结,也有从一般测量技术引申到高精度可调谐测量范围的 IFM 技术的研究。重点阐述了本研究所目前工作中提出的一种具有单光源无滤波结构的 IFM 系统,该方案应用价值高,相较之前类似的研究具有更多优势。可以预见,致力于高精度可调谐 IFM 技术的研究,将有助于突破 IFM 技术应用的障碍,对于推动我国相关领域的研究有着积极意义。

参考文献

- [1] 王大鹏.微波光子技术辅助的瞬时频率测量研究[D].北京:北京邮电大学:2012.
- [2] Wenshen W, Davis RL, Jung TJ, et al. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(10):1996-2001.
- [3] Winnall ST, Lindsay AC, Austin MW, et al. A microwave channelizer and spectroscopy based on an integrated optical Bragg-grating Fabry-Perot and integrated hybrid Fresnel lens system [J]. *Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(2): 868-72.
- [4] Nguyen LVT. Microwave photonic technique for frequency measurement of simultaneous signals [J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, 21(10):642-4.
- [5] Attygalle M, Hunter DB. Improved photonic technique for broadband radio-frequency measurement [J]. *Photonics Technology Letters*, 2009, 21(4):206-8.
- [6] Li J, Fu S, Xu K, et al. Photonic-assisted microwave frequency measurement with higher resolution and tunable range [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(6):743-5.
- [7] Xiaomin Z, Hao C, Zhang X, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator. *microwave and wireless components letters*[J]. *IEEE*, 2009, 19(6):422-4.
- [8] Hao C, Xihua Z, Jianping Y. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, 20(14): 1249-51.
- [9] Dai J, Xu K, Duan R, et al. Instantaneous frequency measurement based on complementary microwave photonic filters with a shared Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24):5738-41.
- [10] Li W, Zhu NH, Wang LX. Brillouin-assisted microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(2):166-8.
- [11] Wei L, Ning Hua Z, Li Xian W. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *Photonics Journal*, 2012, 4(2):427-36.
- [12] Hualin Z, Shilong P. Instantaneous frequency measurement with adjustable measurement range and resolution based on polarisation modulator [J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(4):277-9.
- [13] Li J, Ning T, 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(1):54-61.