

文章编号:1004-9037(2014)06-0885-10

基于光子技术的微波频率测量研究进展

邹喜华 卢 冰

(西南交通大学信息光子与通信研究中心,成都,610031)

摘要:微波频率测量及分析在军用、民用领域中有着重要战略地位和重大需求,并随着通信、雷达、电子对抗中工作频率的不断攀升而面临着前所未有的挑战。近年来以微波光子学为基础的光子型微波频率测量技术应运而生,因其在瞬时带宽、抗电磁干扰方面有着显著优势,得到了长足发展,并具有重要的理论意义和实用价值。针对目前主要研究的光子型微波频率测量方案,如微波光子扫频方案、频率-幅度映射方案、频率-空间映射方案、频率-时间映射方案、光子压缩感知方案、以及数字化测频方案等,介绍了其基本原理及实验方案,并对各种方案的研究现状与进展进行了梳理、分析和总结。最后,对光子型微波频率测量的趋势和前景进行了简要探讨和展望。

关键词:微波光子学;微波频率测量;光电信号处理

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

Advances in Microwave Frequency Measurement Using Photonic

Zou Xihua, Lu Bing

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

Abstract: Microwave frequency measurement and analysis plays a significant role in civil and defense applications. Recently, big challenges emerge as the operating frequency used or to be used in the communication, radar, and electronic warfare increases rapidly. Fortunately, with the development of microwave photonics, a series of photonic approaches and solutions are proposed for measuring the frequency of microwave signals. Thank to the advantages including large instantaneous bandwidth and strong immunity to electromagnetic interference, these photonic approaches can be regarded as emerging solutions both for theoretical research and field applications. Several classic photonics-assisted approaches for microwave frequency measurement, such as those based on photonic scanning, frequency-to-amplitude mapping, frequency-to-space mapping, frequency-to-time mapping, photonic compressive sensing, digitalized microwave frequency measurement, and so on, are introduced with theory and experimental results. Meanwhile, recent advances and applications in photonic microwave frequency measurement are reviewed and summarized. In addition, the corresponding prospects are also briefly discussed.

Key words: microwave photonics; microwave frequency measurement; optical and electronic signal processing

引 言

当前,国防科技、科学研究、工农业生产、日常生活等方面对微波/毫米波技术的依赖度越来越

高,涉及到电子战、雷达、无线通信及空间通信等领域。因而在狭小的地球空间乃至外太空充斥着越来越多的微波信号,如何在这复杂的电磁环境下对微波信号的参数进行测量与分析难度很大。一方面,测量与分析的任务从最初的两大基本测量内容

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2012CB315700)资助项目;国家自然科学基金(61101053)资助项目;教育部新世纪优秀人才(NCET-12-0940)资助项目。

收稿日期:2014-05-24;**修订日期:**2014-10-14

(频率和幅度),发展到包括频率、幅度、相位、信号类型、调制制式、到达方向、到达时间在内的多维参量测量;与此同时工作的频率在节节攀升,几乎跨越了从 2 MHz 到 300 GHz 的频段。此时,电子技术型测量技术因受限于电子瓶颈和瞬时带宽,就需要在频段覆盖范围、测量实时性、测量误差、测量系统的复杂度上做出相应的取舍,而这正是在很多应用场合(尤其在电子战中)应当竭力避免的^[1-2]。

微波光子学的兴起给微波信号接收和检测注入了新的活力、开辟了一条新的思路。作为一门融合光子技术和微波技术的交叉学科,微波光子学基于光子技术生成、传输、处理宽带微波信号,具有瞬时带宽大、质量轻、损耗小、抗电磁干扰能力强等一系列优点^[3]。因而,微波光子方案已成为微波滤波器、微波信号发生和倍频、超宽带(Ultra wide-band, UWB)脉冲的生成和传输、宽带无线通信、高速模/数转换(Analog-to-digital converter, ADC)、波束成行及相控阵天线、微波接收与测量领域的研发热点。其中,光子型微波测频技术更能凸显出光子技术在瞬时带宽、高频频段上的独特优势,因而近年来国内外研究机构先后报道了一系列方案和研究成果,本文将对这些研究进展进行分析和总结以及进行展望。

1 光子型微波频率测量方案

就目前的研究情况来看,光子型微波测频方案大致可以划分为 5 类:扫描型测频、频率-幅度映射型测频、频率-空间映射型测频、频率-时域映射型测频和光子压缩感知技术,如图 1 所示。扫描型测频与宽带电子技术型测频仪表类似,在一个扫描周期内对整个测量区间进行扫描。但在扫描工作模式下,频率测量就失去了实时功效,导致某些时刻猝发的频率信息被遗漏。因此从某种意义上讲,扫描型测频不属于瞬时测频接收体制。可是在一些重要领域(诸如电子战中),通信或信号的

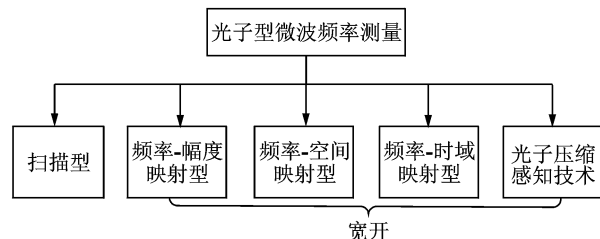


图 1 光子型微波频率测量方案的类型划分

Fig. 1 Different categories for photonic microwave frequency measurement

突发性很强、存在的时间很短,宽带、实时的微波频率测量方案显得尤为重要,即需要在大频段范围内实现实时微波频率测量,这就是瞬时测频的一个重要属性——要求测量或接收体制是“宽开”^[4]。频率-空间映射型、频率-幅度映射型、频率-时域映射型方案以及光子压缩感知技术都属于“宽开”范畴。

1.1 扫描型测频方案

扫描型光子测频方案大致可以分为两类,一类是利用一些光器件的特殊性质,以时域扫描的方式将微波频率信息显示出来,类似于传统的光谱分析仪;它们的主要思路都是待测的微波信号经过电光调制器被调制到光载波上,通过偏置电压的设置,产生所需要的一阶边带(± 1 阶),载波与一阶边带的差频即为微波信号的频率,通过器件的滤波扫描特性,根据探测到的光功率变化,分析得出微波信号的频率^[5-8]。以文献[5]为例,微波信号通过电光马赫-增德尔强度调制器(Mach-Zehnder modulator, MZM)被调制到连续激光光源上;施加直流偏置电压施进行光载波抑制双边带调制,仅生成两个 ± 1 阶光边带;借助斜坡函数控制光纤 Fabry-Perot 标准具进行扫描,根据扫描得到的时域功率谱的分布情况即可推算出待测的微波频率。如图 2(a),基于此结构,作者实现了 40 GHz 测量范围的覆盖,并运用 Rayleigh 判据分析得到 90 MHz 的测量分辨率。基于此类方案实施的微波频率测量精度与所选用光源以及光滤波器的稳定性相关;由于光源的输出波长与光滤波器的滤波谱易受外界环境影响,以及现有光滤波器滤波带宽限制,测量精度往往不是很高。另一类是基于光波长的扫描特性;两波长的光信号经一段色散光纤传输后拍频,相当于一个两抽头的微波光子滤波器。通过改变两波长的间隔或色散值,得到多组微波功率值,通过对得到的数据进行处理,得到待测微波信号的频域信息^[9-12]。如图 2(b)所示,一个固定波长的激光光源和一个波长扫描的激光光源经马赫增德尔调制器被待测的微波信号调制进入到色散介质中,调节两激光源的波长间隔,探测得到多组微波信号的功率,通过对所得到的数据反傅里叶变换,即可以得到微波信号的频率信息。实验中实现了多个频率分量的估计,同时测量精度可以达到 15 MHz。此外,文献[12]基于光波长扫描混频技术实施微波频率测量。在整个扫描周期里,都有一个固定波长在对应的时间窗口下被标定为一个单独的信道。经光电转换后,即可得出微波信号的频率。实验中

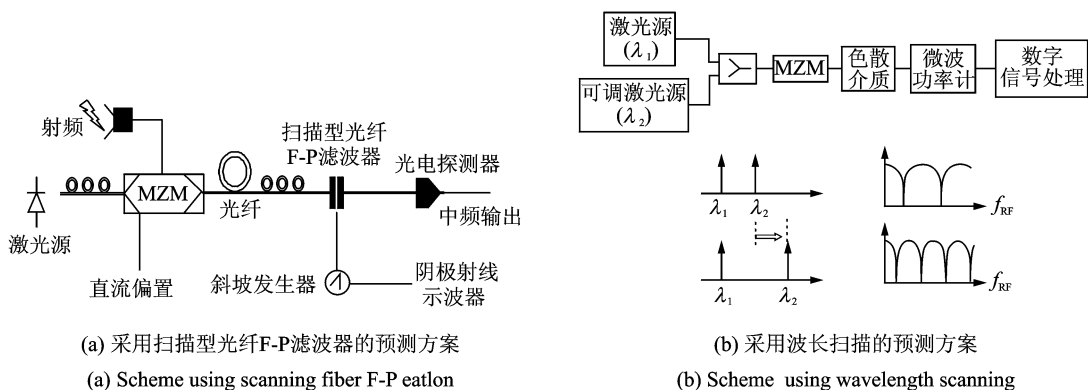


图 2 扫描型微波光子测频方案

Fig. 2 Photonic frequency measurement schemes by using scanning

20 GHz的带宽内测量时间为 5 μ s, 测量精度达到 2 MHz。此类测频方案能突破光滤波器的带宽限制, 在微波域对待测微波信号进行处理, 测量精度有了较大的提高。

1.2 频率-幅度映射型测频方案

频率-幅度映射型测频方案的物理机制是将微波信号的频率信息转换成幅度(或功率)信息, 通过检测幅度信息间接测量出待测频率值。在频率-幅度映射过程中, 又可以将它们分为两小类: 一类是将微波频率信息转换成微波功率, 探测和对比微波功率值解调得到频率值^[13-26]; 另一类是将微波频率信息转换成光功率(或直流信号), 以光功率探测的方式来分析微波频率^[27-41]。

1.2.1 基于微波功率检测

将微波频率信息转换成色散导致的微波功率衰减效应或者微波滤波响应。

微波功率衰减效应在光载无线电(Radio over fiber, RoF)等系统中应尽量避免和克服, 但在色散测量和微波测量中却有用武之地。基于微波功率衰减的测频方案主要观点是: 分别采用强度调制器、相位调制器、偏振调制器^[13-20], 引入两个随频率而变化趋势不同的微波功率衰减函数; 一旦确定了色散值, 通过两者的比值建立起微波功率比值与微波频率的关联(见式(1)), 解调出微波频率。由于采用功率比值的方式, 所测量的微波频率是与微波信号的功率无关, 消除了功率因素的干扰。

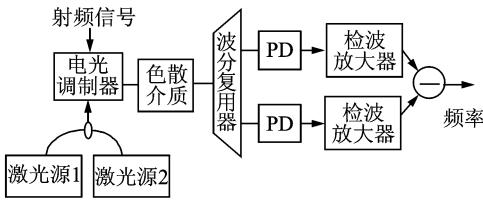
$$\gamma(f) = \frac{P_1(f)}{P_2(f)} = \frac{\left[\cos\left(\frac{\pi\chi_1\lambda_1^2 f^2}{c} + \alpha\right) \right]^2}{\left[\cos\left(\frac{\pi\chi_2\lambda_2^2 f^2}{c} + \beta\right) \right]^2} \quad (1)$$

式中: f 为待测频率, λ_i, χ_i 分别为光波长和波数

对应的色散值。需要指出的是, α, β 为各种方案下引入的不同相位量, 也是各种方案的不同之处。

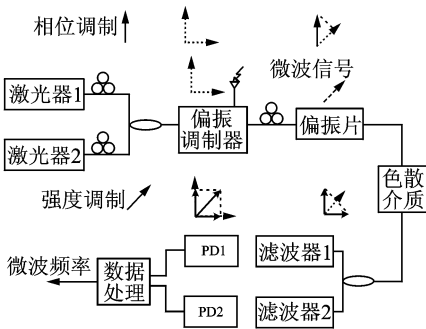
2006年, L. Nguyen 等人率先基于微波功率衰减效应实施了光子型微波测频方案^[13]。研究人员先后利用不同类型的调制器、不同类别的色散介质来设计和实施新型测频方案, 分别实现了宽带测频范围、可调谐测频范围以及高测频分辨率等^[14-18]。如图 3(a)所示, 文献[13]采用了强度调制器, 此时 $\alpha = \beta = 0$, 并由啁啾光纤光栅组成的两个信道来提供不同的色散值, 产生两个功率衰减函数。如果采用常规的单模光纤, 利用波长间隔较大(几十纳米)的两个波长来引入不同的色散值, 此时可以采用强度调制器^[14] ($\alpha = \beta = 0$) 或相位调制器^[15] ($\alpha = \beta = \pi/2$) 来完成测量; 在这两种方案下, 通过调节波长间隔可以实现测频范围和测频精度的灵活调谐。文献[16]采用了双端口型强度调制器, 在啁啾调制的状态下 $\alpha = -\pi/4, \beta = +\pi/4$; 由于 α 和 β 取不同的值, 得到的两个微波功率衰减函数的趋势就不同, 扩大了测量范围。此外, 还可以采用先在电域混频, 再结合两个并行的强度调制器对接收信号和变频信号分别进行调制, 调节两个强度调制器的啁啾系数(即 α, β 不同)可以在 40 GHz 范围内实现测频^[17]。由于相位调制和强度调制下色散导致的微波功率衰减趋势完全互补, 此时 $\alpha = +\pi/2$ 和 $\beta = 0$; 以此两互补型的微波功率衰减函数进行比对, 功率比值随频率的变化趋势在大范围内具有较大的斜率, 从而进一步扩大了测量范围。两个调制深度一致的强度调制和相位调制, 可以通过偏振调制器和偏振分束器来实现, 也可以通过相位调制器和检偏器来实现, 抑或两个并列的强度调制器和相位调制器来实现^[18-20]。以文献[20]为例, 如图 3(b)所示, 测量的两个微波功率函数分别以

正弦和余弦函数平方的关系变化,在功率比值中明显可以看出测量范围的扩大,在 2~19 GHz 的测量范围内,测量误差为 ± 0.2 GHz。另外,基于受激布里渊散射效应或者双平行马赫增德尔调制器(Dual-parallel Mach-Zehnder modulator, DPMZM)改变光载波的相位,使 α 变化, $\beta=0$, 实现测量精度和测量范围的可调谐^[21-22]。



(a) 采用两信道光纤光栅的方案

(a) Scheme using two-channel fiber grating



(b) 采用偏振调制器的方案

(b) Scheme using polarization modulator

图 3 基于微波功率的检测方案

Fig. 3 Schemes based on microwave power detection

需要指出的是:在这一系列方案中都要涉及到两个信道的调制,一般来说调制在同一个调制器内完成比较好,这样便于获得同步的、调制深度抑制的两个调制效果,否则就无法消除功率因素的干扰。

微波光子滤波效应以光子技术构建有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)型或者无限脉冲响应(Infinite impulse response, IIR)型微波光子滤波器,进而可利用其滤波响应曲线解调出微波频率。最近的相关成果报道主要包括几个例子^[23-26]。本课题组利用相位调制器和单模光纤设计了双抽头的 FIR 微波滤波器^[23],可供实施远程微波频率测量;加拿大渥太华大学的 Pan S. 等人设计了两个双抽头的 FIR 微波光子滤波器(一个仅含正系数,另一个则含有负系数)^[24],以之成功地实施测频。相比于 FIR 滤波响应, IIR 滤波响应易于提供更为陡峭的斜率,在微波测频也得以体

现。北京邮电大学研究人员联合南洋理工大学以非相干光源设计了 IIR 滤波器^[25],在实验测量范围内获得了较高的测频精度;南洋理工大学同渥太华大学研究人员共同开发了 FIR 和 IIR 微波滤波器的级联结构^[26],以两者的滤波响应组合实施测频,从而改善了测频分辨率。

1.2.2 基于光功率检测

微波频率信息可被转换成光功率或直流功率,其显著优势在于低速光探测器(Photodetector, PD)的采用,可以通过光学滤波或者光域混频来实现^[27-41]。光学滤波方法中,在载波抑制、小信号调制下仅得到 ± 1 阶光边带,并将两个 ± 1 阶光边带输入到正弦型滤波谱中;经滤波后, ± 1 阶光边带携带的光功率随微波频率变化而增大或减小,对比两个变化趋势相反的光功率分布,从而得到与微波功率、光功率无关的功率比值与微波频率的对应关系

$$R = \frac{1 - \gamma \cos(\Omega/F)}{1 + \gamma \cos(\Omega/F)} \quad (2)$$

式中: $\Omega=2\pi f$ 为角频率, γ 为光梳状滤波器波峰和波谷相对抑制比, F 为光梳状滤波器的自由频谱范围。如图 4(a),文献[27]采用两个激光光源和一个梳状滤波器,两个光源的输出波长分别置于梳状滤波谱的波峰和波谷位置,以获得两个变化趋势相反的光功率分布。文献[28,29]则仅采用单个光源和一对互补型梳状滤波器,只需将光源波长对准其中一个梳状谱的波峰(或波谷),那么此波长必然对准另一互补型梳状谱的波谷(或波峰),如图 4(b)中结构。由于两支路光功率来自同一光源,不仅简化了测量系统,而且两支路中光功率的波动始终是同步的;此时,光源功率波动对微波频率测量的影响完全被消除。实验测量结果:与输入的微波扫描频率对比,以测量误差低于 ± 0.2 GHz 为基准,三种对比度下分别得到了 2~20, 2~24 和 1~26 GHz 的测量范围。上述的方案多数针对连续微波信号频率测量,脉冲微波信号作为重要的信号格式被广泛用在通信、雷达、电子战等领域。文献[30,31]都讨论了利用互补光滤波器实现对脉冲微波信号的频率测量。其中文献[31]提出的方案能实现连续波微波信号和脉冲微波信号的分离和测量,扩大了此结构的应用范围^[30]。

区别于上述方案的无模糊测量范围(大小为自由频谱区的一半),最近利用光载波波长相对于梳状滤波响应的初始位置来构建两个正交光功率比值函数,从而以边沿滤波途径实现了覆盖整个自由

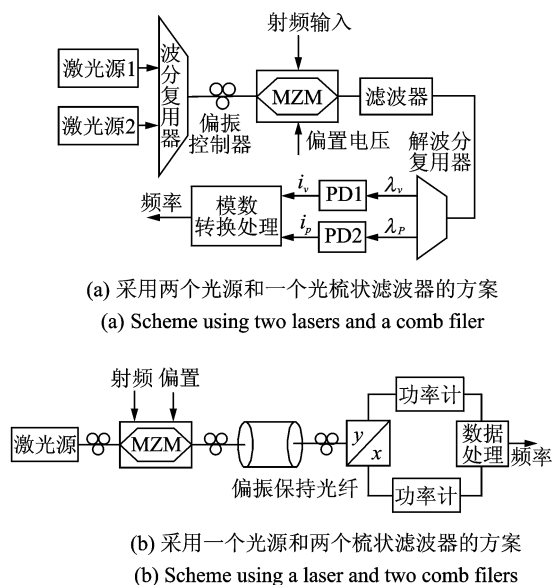


图 4 基于滤波的光功率检测方案

Fig. 4 Schemes based on optical power detection using optical filter

频谱范围 (Free spectral range, FSR) 的测频范围^[32-33];以之作为解调方式用于设计级联、并联型组合方案。此外,以光纤光栅作为滤波器实施边沿滤波可以提高测频的稳定性;浙江大学与加拿大渥太华大学的研究人员先后设计了具有高斯型反射谱的光纤光栅^[34]、具有与频率成反比的反射频响的光纤光栅^[35],以光栅的透射谱和反射谱作为组合滤波器对光边带实施滤波,从滤波后的光功率比值中检测出微波频率。

光域混频可以通过两个串联的调制器、半导体光放大器 (Semiconductor optical amplifier, SOA) 中的交叉增益调制、或高非线性光纤 (Highly nonlinear optical fiber, HNLF) 中的四波混频效应以及双重调制来实现^[36-41]。文献[36]将微波信号分别施加在两个强度调制器上,鉴于时序上前后串联的结构,调制在光载波上的微波信号与它自身的延迟信号进行混频,并根据已知的时延量和检测的相位关系解调出微波频率。此结构中由于采用电缆引入的时延量偏大,因而单个单调测量区域较小,如 2.2~3 GHz;而后作者以 Hilbert 变换的形式、采用 3 个光波长和光纤光栅来引入时延^[37],同样以分区段的方式实现了在 1~10 GHz 范围的覆盖。文献[38,39]则利用 HNLF 产生四波混频效应,并从光域上引入时延,最终将低频分量功率与时延、链路的色散关联起来,亦以分段的形式覆盖了 1~40 GHz 的频段。此时单个单调测量区域明显扩大(约为 1~12 GHz),但从其测量过程中光源

功率和微波功率对测量结果的影响还得进一步采取修订方案加以消除。文献[40]混频过程是利用电吸收调制器的二次调制过程实现,通过调制和重调制实现微波信号频率和功率的测量,实验中 12 GHz 的带宽内测量精度可以达到 10 MHz 以内。另外,文献[41]提出了一种对频率捷变雷达的可重构微波光子 I/Q 探测。该系统基于可重构的光子 Hilbert 变换以实现对输入信号的正交探测,能够探测到具有低幅度和相位不平衡的频率捷变/跳频信号。实验中在 3.5~35 GHz 的范围内,实现了最大 -35 dB 的幅度不平衡信号检测。

1.3 频率-空间映射型测频方案

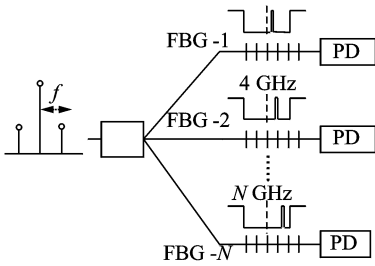
在频率-空间映射型测频方案中,微波频率信息被转换成空间位置上的分布或者不同输出端口上的分布,这里亦称之为信道化滤波器型测频。

早期的微波光子信道化滤波器可以追溯到声光型信道化滤波器。而根据最近的报道,信道化滤波器可以由以下元件来构造^[42-50]:电光延迟线阵列、高分辨率的自由空间衍射光栅、相移光栅阵列、光纤光栅和 Fresnel 棱镜的集成系统,结合标准具和波分复用器的系统等。这些方案的工作原理大致相同:在小信号载波抑制调制下,将微波信号调制到一个连续光源上产生 ±1 阶光边带,光边带与光载波在频域上的距离即为待测频率。检测光边带偏离光载波的距离,即确定光边带落在光滤波器或光滤波器阵列的哪一个通带内(每一个通带对应一个微波频段划分区),则可检测出微波频率。

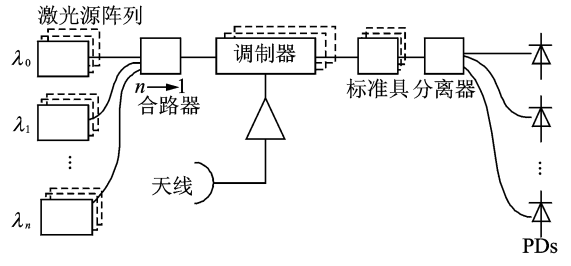
如图 5(a)所示,作者采用一系列的相移光栅来构建信道化滤波器^[42]:单个相移光栅的滤波通带约为 2 GHz,相邻两个相移光栅的滤波通带之间的频率偏移量为 2 GHz;不同频率分量对应的 +1 阶或 -1 阶光边带落在不同相移光栅的通带中;在输出端,通过监测连接在相移光栅之后的每一个探测器的输出功率而检测出频率分量。这种信道化滤波器通常是大致确定微波频率所处于的波段(比如分辨率为 2 GHz),然后用并行的窄带处理方法得到精确的频率值。文献[45]的工作原理有所不同:如图 5(b)所示,作者借助多个连续激光光源、一个标准具和一个波分复用器,其巧妙之处在于对连续光源波长的设定:一个光波长对应标准具的一个信道和波分复用器的一个信道;光波长与标准具信道之间的频率间隔线性递增,每一个标准具的信道对应一个特定的频段区间。因而,不同微波频率分量调制连续光源后所生产的 +1 阶(或 -1 阶)光

边带落在标准具不同信道里,检测标准具各个信道的光功率即可获得微波频率。为简化结构,如图 5(c)所示,文献[46]提出利用 Fabry-Perot 标准具切割宽带光源作为光载波阵列,结合第 2 个 Fabry-Perot 标准具构建信道化滤波。然而,文献[45, 46]所用的光载波是非相干光源阵列,噪声较大,特别是互不相关的光源阵列波长偏移会引起较大的测量误差。此后,各课题组利用光学频率梳作为光源阵列,结合 Fabry-Perot 标准具,设计级联或者并联的结构实现信道化接收机^[47-50],改善了系统的

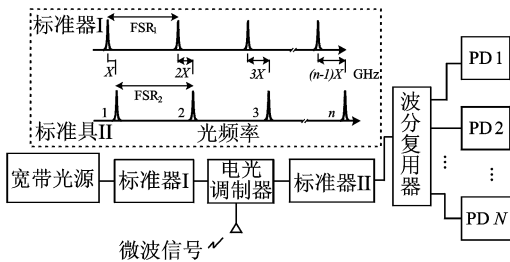
稳定性。此外,如图 5(d)所示,本课题组基于不同波长泵浦源在非线性光纤中产生受激布里渊增益谱位置不同,构建信道化滤波器,同时通过改变泵浦光的形状,使每个信道滤波谱的形状因子低于 $2^{[51]}$ 。另外,文献[52]设计了一种时域采样的信道化方案,待测微波信号进入到时域拉伸系统展宽,后经光信道化滤波器滤波,拍频后得到的多个功率数值经傅里叶变换后可以得到高分辨率的测频精度,在单个信道为 25 GHz 带宽下测量精度可达到 55 MHz。



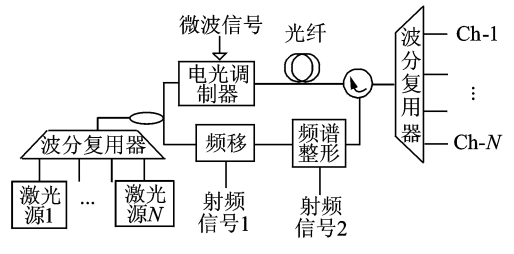
(a) 基于相移光纤光栅阵列滤波器的方案
(a) Scheme using phase-shifted fiber gating



(b) 基于多光源阵列和Fabry-Perot标准具的方案
(b) Scheme using laser array and Fabry-Perot etalon



(c) 基于切割宽带光源和Fabry-Perot 标准具的方案
(c) Scheme using spectrum sliced incoherent source and Fabry-Perot etalon



(d) 基于受激布里渊效应的多信道滤波器
(d) SBS-based channelizer

图 5 基于频率-空间映射方案

Fig. 5 Schemes based on frequency-to-space mapping

1.4 频率-时域映射型测频方案

频率-时域映射型测频方案,是根据不同波长光波通过色散介质的时延不同,将待测微波信号加载在光波上,建立微波信号频率与时延的关系^[53-54]。以文献[53]为例,如图 6 所示,待测的微波信号经过电光调制器以载波抑制双边带调制被调制到高功率连续的激光源上,产生了 ± 1 阶光边带,进入到啁啾的光纤布拉格光栅(Fiber bragg grating, FBG)中,不同波长光信号通过 FBG 产生的延迟不同,此方案中作者在进入 FBG 前先通过功能类似光开关的步恢复操作以设置时间测量参考点,通过测量光电探测器拍频产生微波信号时域

波形的相对延迟时间,推测出微波信号的频率。该方案能实现多个微波信号频率的测量,作者基于该方案实现了 20 GHz 和 40 GHz 的微波信号的测量。

1.5 基于光域压缩感知技术

光域压缩感知技术是针对频率稀疏的微波信号,通过一个与傅里叶基不相关的观测矩阵将原始信号的尺寸大大压缩后进行采样,并通过重构算法以高概率准确恢复出原始信号^[55]。2011 年,美国海军实验室首次报道了基于光子压缩采样链路方案,以 500 MS/s 的采样率对 1 GHz 的信号进行了重构^[56]。随后,研究人员构建平衡探测机制、混频

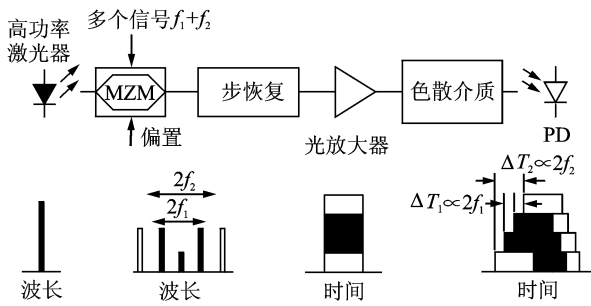


图 6 基于频率-时间映射方案

Fig. 6 Scheme based on frequency-to-time mapping

结构或者时域拉升结构对频域稀疏信号进行压缩重构^[57-60]。以文献[57]为例,该方案首先将待测的微波信号调制到被一段色散光纤展宽的光脉冲上,调制后的光信号经第二段色散光纤展宽后进入到 PD 中,拍频产生的电信号经带通滤波器滤除低频和直流成分。滤波后的电信号与伪随机序列混频,这样携带待测微波信号信息的频谱被搬移到整个频域范围内,经低通的电滤波器滤波、采样,对获得的数据信息以重构算法恢复出原信号。方案中 ADC 采样速率可以降低到原信号奈奎斯特速率的 $1/(R_{ST} \times R_{CS})$ 倍,其中 R_{ST} 为时域拉伸因子, R_{CS} 为压缩感知采样系统的压缩因子,如图 7 所示。基于光域压缩感知技术主要针对频域稀疏的信号,但对于宽谱和频谱密集型信号,此技术有一定的局限性。

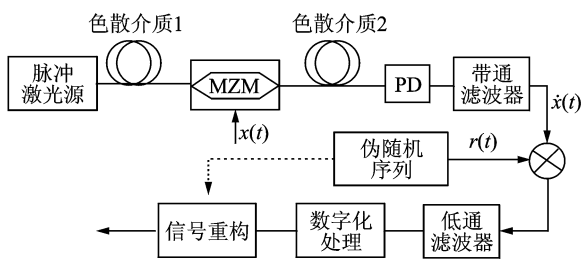


图 7 基于光子时域拉伸的压缩感知技术

Fig. 7 Scheme based on photonic time stretching and compressive sampling

1.6 其他方案—数字化测频

随着数字信号处理技术和模数转换技术的发展、数字化接收的发展趋势,数字化为微波测频方案的重要发展方向和趋势,其在数字信号处理、长期存储以及与数字化仪器设备兼容方面优势明显,比如清华大学研究小组的光脉冲欠采样和异步光采样进行测频研究^[61]。

此外,文献[62]提出一种基于相移梳状滤波器

阵列的数字化频率测量方案:梳状滤波器阵列由 N 个并联的梳状滤波器组成,各滤波器具有相同的 FSR,相邻两个梳状滤波器的相对相位差为 π/N ,当待测微波信号经过载波抑制单边带调制生成的单边带(+1 或 -1 阶)耦合进此梳状滤波器阵列中,经过光电检测、比较、判别后,可以将微波信号的频率信息转换为 N 位二进制编码的数字化输出。作者基于此方案实现了 $0 \sim 40$ GHz 的 5 位二进制编码的数字化频率输出,编码效率为 3.32。此方案结构简单,但编码的效率较低,测频的精度还有待提高。

文献[63]提出了基于倍增 FSR 式的光梳状滤波器阵列,设计了一种数字化微波频率测量方案,实现了具有自然二进制编码的数字输出。此方案尽管编码效率高,但结构复杂,特别是多个倍增 FSR 光滤波器阵列实现较为困难。为简化实现方案,同时保持较高的数字输出编码效率,提出了改进型的光梳状滤波器阵列实现数字化频率测量。利用多个相移光滤波器及一个额外的具有二倍 FSR 的光滤波器,实现微波信号频率测量的数字化输出。此方案不但扩大了微波信号频率的测量范围,同时改善了数字编码效率^[64]。文献[65]提出一种基于色散导致的微波功率衰减函数实施光子数字化频率测量。该系统由多个信道组成,且每个信道都预先设置好色散量。整个编码过程类似于光子模数转换,实验中在 17.5 GHz 的频率范围内实现了 4-bit 的数字化输出。

2 结束语

作为微波光子学的一个重要方向,光子型微波信号检测与分析在大瞬时带宽、低损耗、强抗电磁干扰能力方面具有显著的优势,研究和应用前景十分广泛。本文介绍和分析了微波光子测频方案的研究现状及进展,具体为各种类型的多种光子学频率测量方案。这些方案中,频率-幅度映射型测频比较适用于单个载频分量的测量,当接收到多个频率分量时会造成了测频模糊;然而频率-空间映射型测频中信道化滤波器各个信道之间的测量时互相独立的,因而它在多个微波信号、多频率分量测量中有着独特的优势,尤其在复杂电磁环境下有着广泛的应用前景。

基于微波光子学实时微波频率测量方面的研究工作正处于由萌芽到高速发展的上升阶段,开展相关的研究和设计创新工作不仅具有重大的现实意义和广阔的前景,还面临着难得的机遇。相比较

于电子技术型方案,已提出的基于微波光子学的微波频率测量方案在瞬时带宽、抗电磁干扰、低损耗上的确有着十分明显的优势,但其发展和工程化应用还需要付诸更多的努力。包括微波光子测频方案的系统开发,测量的瞬时性性能,分辨率的提高、多个频率分量的测量、动态范围的改善、非线性调制效应的消除、数字化测频等。其次,面对日益复杂的电磁环境和实际应用场合,处于起步阶段的微波光子测频面临着功能多元化的挑战,测量的对象需要从单个频率分量扩展到多个频率分量、多个微波信号,甚至是不同类型(连续式、脉冲式)、不同调制制式的微波信号等^[1-7],以满足实际环境和不同应用中的需求。

参考文献:

- [1] Tsui J B. Microwave receivers with electronic warfare applications [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [2] 郑禹,陆鹏程. 基于实测数据的稀布阵雷达干扰方向估计[J]. 数据采集与处理,2014, 29(4): 620-624.
Zheng Yu, Lu Pengcheng. Interference location estimation for synthetic impulse and aperture sparse radar based on real data [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4): 620-624.
- [3] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [4] 胡来招. 瞬时测频[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
Hu Laizhao. Instantaneous frequency measurement [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [5] Winnall S T, Lindsay A C. A Fabry-Perot scanning receiver for microwave signal processing [J]. IEEE Trans Microwave Theory Techn, 1999, 47(7): 1385-1390.
- [6] Rugeland P, Yu C, Sterner C, et al. Photonic scanning receiver using an electronically tuned fiber Bragg grating [J]. Opt Lett, 2009, 34(24): 3794-3796.
- [7] Guo H, Xiao G, Mrad M, et al. Measurement of microwave frequency using a monolithically integrated scannable echelle diffractive grating [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(1): 45-47.
- [8] Zheng S L, Ge S X, Zhang X M, et al. High-resolution multiple microwave frequency measurement based on stimulated brillouin scattering [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(13): 1115-1117.
- [9] Li R L, Chen H W, Yu Y, et al. Multiple-frequency measurement based on serial photonic channelization using optical wavelength scanning [J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4781-4784.
- [10] Gu Y, Li S, Han X, et al. A photonic approach to broadband microwave frequency measurement[C]// 2010 IEEE Topic Meeting on Microwave Photonics (MWP). [S.l.]: IEEE, 2010: TH4-13.
- [11] Didal B, Mengual T, Marti J. Photonic technique for the measurement of frequency and power of multiple microwave signals [J]. IEEE Trans Microw Theory Techn, 2010, 58(11): 3103-3108.
- [12] Wang Y, Chi H, Zhang X, et al. Photonic approach for microwave spectral analysis based on Fourier cosine transforms [J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3897-3899.
- [13] Nguyen L V T, Hunter D B. A photonic technique for microwave frequency measurement [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(9/12): 1188-1190.
- [14] Zou X H, Yao J P. An optical approach to microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2008, 20(23): 1989-1991.
- [15] Zhang X, Chi H, Zhang X, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using an optical phase modulator [J]. IEEE Microwave Wireless Components Lett, 2009, 19(6): 422-424.
- [16] 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): 743-745.
- [17] Attygalle M, Hunter D B. Improved photonic technique for broadband radio-frequency measurement [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(4): 206-208.
- [18] Zhou J Q, Fu S, Aditya S, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using photonic technique [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(15): 1069-1071.
- [19] Zhou J Q, Fu S, Shum P P, et al. Photonic measurement of microwave frequency based on phase modulation [J]. Opt Exp, 2009, 17(9): 7217-7221.
- [20] 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]. J Lightw Technol, 2009, 27(23): 5314-5320.
- [21] Li W, Zhu N H, Wang L X. Brillouin-assisted microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution [J]. Opt Lett,

- 2012, 37(2):166-168.
- [22] Li W, Zhu N H, Wang L X. Reconfigurable instantaneous frequency measurement system based on dual-parallel mach-zehnder modulator[J]. IEEE Photon J, 2012, 4(2): 426-436.
- [23] 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 Photon Technol Lett, 2010, 22(15): 1090-1092.
- [24] Pan S L, Yao J P. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter pair [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(19): 1437-1439.
- [25] Niu J, Fu S N, Xu K, et al. Instantaneous microwave frequency measurement based on amplified fiber-optic recirculating delay loop and broadband incoherent light source [J]. J Lightw Technol, 2011, 29(1): 78-84.
- [26] Zhou J, Aditya S, Shum P P, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter with an infinite impulse response [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(10): 682-684.
- [27] Chi H, Zou X H, Yao J P. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2008, 20(14): 1249-1251.
- [28] Zou X H, Chi H, Yao J P. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair [J]. IEEE Trans Microw Theory Techn, 2009, 57(2): 505-511.
- [29] Drummond M V, Monteiro P, Nogueira R N. Photonic RF instantaneous frequency measurement system by means of a polarization-domain interferometer [J]. Opt Exp, 2009, 17(7): 5433-5438.
- [30] Pan S L, Fu J. B, Yao J P. Photonic approach to the simultaneous measurement of the frequency, amplitude, pulse width, and time of arrival of a microwave signal[J]. Opt Lett, 2012, 37(1): 7-9.
- [31] Lu B, Pan W, Zou X H, et al. Photonic frequency measurement and signal separation for pulsed/CW microwave signal[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(5):500-503.
- [32] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Full-scale phase demodulation approach for photonic instantaneous frequency measurement [J]. Opt Lett, 2010, 35(16): 2747-2749.
- [33] 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 Photon Technol Lett, 2011, 23(1): 39-41.
- [34] Li Z, Yang B, Chi H, et al. Photonic instantaneous measurement of microwave frequency using fiber Bragg grating [J]. Opt Commun, 2010, 283(3): 396-399.
- [35] Li Z, Wang C, Li M, et al. Instantaneous microwave frequency measurement using a special fiber Bragg grating [J]. IEEE Microwave Wireless Components Lett, 2011, 21(1): 52-54.
- [36] Sarkhosh N, Emami H, Bui L, et al. Reduced cost photonic instantaneous frequency measurement system [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(18): 1521-1523.
- [37] Emami H, Sarkhosh N, Bui L A, et al. Amplitude independent RF instantaneous frequency measurement system using photonic Hilbert transform [J]. Opt Exp, 2008, 16(18): 13707-13712.
- [38] Sarkhosh N, Emami H, Bui L A, et al. Photonic instantaneous frequency measurement using non-linear optical mixing[C]//IEEE MTT-S International microwave symposium Digest. [S. l.]; IEEE, 2008: 599-601.
- [39] Bui L A, Pelusi M D, Vo T D, et al. Instantaneous frequency measurement system using optical mixing in highly nonlinear fiber [J]. Opt Exp, 2009, 17(25): 22983-22991.
- [40] Drummond M V, Marques C A F, Monteiro P P, et al. Photonic instantaneous microwave frequency measurement system based on signal remodulation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(16): 1226-1228.
- [41] Emami H, Sarkhosh. N. Reconfigurable microwave photonic in-phase and quadrature detector for frequency agile radar[J]. J Opt Soc Am A, 2014, 31(6): 1320-1325.
- [42] Hunter D B, Edvell L G, Englund M A. Wideband microwave photonic channelised receiver [C]//International Topical Meeting Microwave Photonics Techig. Seoul, Korea:[s. n.], 2005:249-252.
- [43] Wang W, Davis R L, Jung T J R, et al. Characterization of a coherent optical RF channelizer based on a diffraction grating [J]. IEEE Trans Microw Theory Techn, 2001, 49(10): 1996-2001.
- [44] Winnall S T, Lindsay A C, Austin M W, et al. A microwave channelizer and spectroscope based on an integrated optical Bragg-grating Fabry-Perot and in-

- tegrated hybrid Fresnel lens system [J]. *IEEE Trans Microw Theory Techn*, 2006, 54(2): 868-892.
- [45] Volkening F A, Photonic channelized RF receiver employing dense wavelength division multiplexing [P]. USA Patent 7245833B1, 2007.
- [46] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Photonic approach for multiple-frequency-component measurement using spectrally-sliced incoherent source [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3): 438-440.
- [47] 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]. *Opt Commun*, 2012, 285(9): 2311-2315.
- [48] Wang L X, Zhu N H, Li W, et al. Polarization division multiplexed photonic radio-frequency channelizer using an optical comb [J]. *Opt Commun*, 2013, 286: 282-287.
- [49] 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 Photon Technol Lett*, 2012, 24(8): 661-663.
- [50] Xie X J, Dai Y T, Ji Y, et al. Broadband photonic RF channelized based on coherent optical frequency combs and I/Q demodulators [J]. *IEEE Photon J*, 2012, 4(4): 1195-1202.
- [51] 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 Trans Microw Theory Techn*, 2013, 61(9): 3470-3478.
- [52] Wang C, Yao J P. Ultrahigh-resolution photonic-assisted microwave frequency identification based on temporal channelization [J]. *IEEE Trans Microw Theory Techn*, 2013, 61(12): 4275-4282.
- [53] Nguyen L V T. Microwave photonic technique for frequency measurement of simultaneous signals [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(10): 642-644.
- [54] Nguyen T A, Chan Erwin H W, Minasian R A. Instantaneous high-resolution multiple-frequency measurement system based on frequency-to-time mapping technique [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(8): 2419-2422.
- [55] 张弓, 杨萌, 张劲东, 等. 压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展[J]. *数据采集与处理*, 2012, 27(1): 1-12.
- Zhang Gong, Yang Meng, Zhang Jindong, et al. Advances in theory and application of compressed sensing in radar target detection and recognition [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2012, 27(1): 1-12.
- [56] Nichols J M, Bucholtz F Beating Nyquist with light: a compressively sampled photonic link [J]. *Opt Exp*, 2011, 19(8): 7339-7348.
- [57] Chi H, Mei Y, Chen Y, et al. Microwave spectral analysis based on photonic compressive sampling with random demodulation [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(22):4636-4638.
- [58] Yan L, Dai Y T, Xu K, et al. Integrated multifrequency recognition and downconversion based on photonics-assisted compressive sampling [J]. *IEEE Photon J*, 2012, 4(3): 633-670.
- [59] Chi H, Chen Y, Mei Y, et al. Microwave spectrum sensing based on photonic time stretch and compressive sampling [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(2):136-138.
- [60] Bosworth Bryan T, Foster Mark A. High-speed ultrawideband photonicly enabled compressed sensing of sparse radio frequency signals [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22):4892-4895.
- [61] 彭越, 张洪明, 姚敏玉. 光脉冲欠采样宽带数字测频方法的设计与分析[J]. *光电工程*, 2008, 35(3): 68-73.
- Peng Yue, Zhang Hongming, Yao Minyu. Design and analysis of wideband digital frequency measurement based on optical sub-sampling [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(3): 68-72.
- [62] Zou X H, Pan W, Luo B, et al. Photonic approach to microwave frequency measurement with digital circular-code results [J]. *Opt Exp*, 2011, 19(21): 20580-20585.
- [63] 卢冰, 邹喜华, 潘炜, 等. 基于倍增FSR式光梳状滤波器阵列的瞬时频率测量研究[J], *光电子·激光*, 2012, 23(1): 126-129.
- Lu Bing, Zou Xi Hua, Pan Wei, et al. Investigation on instantaneous frequency measurement based on an optical filter array with multiple FSRs [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(1): 126-129.
- [64] Lu B, Pan W, Zou X H, et al. Photonic microwave frequency measurement with high-coding-efficiency digital outputs and large measurement range [J]. *IEEE Photon J*, 2013, 5(5): 5501906.
- [65] Chen Y, Yan B, Chi H, et al. Photonic instantaneous frequency measurement with digital output based on dispersion induced power fading functions [J]. *Opt Commun*, 2013, 292: 53-56.
- 作者简介: 邹喜华(1981-), 男, 副教授, 博士生导师, 德国洪堡基金, 四川省青年科技奖获得者, 教育部新世纪优秀人才, 全国优博提名奖获得者, 研究方向: 微波光子学、光通信、光电信号处理及器件研制, E-mail: zouxiuhua@swjtu.edu.cn; 卢冰(1986-), 男, 博士, 研究方向: 微波光子学、光通信。