

文章编号: 1001-3806(2018)03-0404-06

基于光子学的微波信号频率测量研究进展

邢俊娜, 何红霞, 池 灏*

(浙江大学 信息与电子工程学院, 杭州 310027)

摘要: 微波频率测量是电子侦察中的重要内容,随着雷达电子战的发展,微波工作频率不断攀升,电域的测频方案由于测量带宽的限制,无法满足电子侦察的发展需求。利用微波光子技术实现频率测量的系统具有瞬时带宽大、低损耗、抗电磁干扰等特点,能克服电子领域在微波频率测量中所面临的瓶颈问题。根据目前基于光子学的微波信号频率测量方案,从瞬时频率测量、光子辅助微波信道化、多频测量、基于光子模数转换技术、光子压缩感知技术5种不同类型的测频原理展开了介绍和分析,并对基于集成光学的微波信号频率测量技术进行了探讨。在微波信号频率测量技术的发展中,基于光子学的测量方法具有广阔的应用前景。

关键词: 光子学;微波频率测量;光电信号处理;电子侦察

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.022

Research progress of frequency measurement of microwave signal based on photonics

XING Junna, HE Hongxia, CHI Hao

(College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Microwave frequency measurement is an important part of electronic reconnaissance. With the development of radar electronic warfare, the operating frequency of microwave increases rapidly. Conventional electronic frequency measurement schemes cannot meet the development of electronic reconnaissance due to their limitation in measurement bandwidth. Approaches of microwave frequency measurement based on photonics have the characteristics of large instantaneous bandwidth, low loss and immunity to electro-magnetic interference. According to the current frequency measurement schemes of microwave signal based on photonics, five technical approaches are introduced and discussed, including instantaneous frequency measurement, photonic-assisted microwave channelization, multi-frequency measurement, microwave frequency measurement based on photonic analog-to-digital conversion, photonic compressive sensing. Moreover, the potential of integrated optics for photonics-based microwave frequency measurement is briefly discussed. In the development of microwave frequency measurement, the photonics-based method has a broad prospect of application.

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

引言

雷达侦察是雷达电子战的一个重要组成部分,其任务在于确定敌方雷达存在与否,并测定其各种特征参量。在现代复杂的电磁环境下,为了实施有效的干扰,必须首先对信号进行分选和威胁识别,雷达的频率

信息是进行信号分选和威胁识别的重要依据^[1],它能反映雷达的功能和用途、频率捷变雷达的捷变频范围和频谱宽度等重要指标。测频范围和测量精度是体现测频接收机性能的两个重要参量。传统电域的频率测量方法有直接测频法、相位转换测频法、数字化测频法、内插测频法以及混频测频法等,但这些方法对应的测频系统存在窄带宽、体积大、价格昂贵和受电磁干扰等问题。在现代电子战接收机中,不但要求对电磁场环境中的微波信号具有高效的截获及识别能力,并且需要能处理大带宽信号。随着雷达电子战的发展,要求测频接收机能够覆盖高达0.5GHz~18GHz甚至更高的频段^[2],由于电子领域模数转换速率和瞬时带宽

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61575171)

作者简介:邢俊娜(1994-),女,硕士研究生,现主要从事微波光子学中微波信号频率测量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: chihao@zju.edu.cn

收稿日期:2017-06-15;收到修改稿日期:2017-07-25

的瓶颈限制,无法满足测频的发展需求。基于光子学的微波信号频率测量可以在大瞬时带宽、宽频率覆盖、低频依赖损耗以及对电磁干扰的强抗扰性方面提供卓越的性能^[3]。目前微波光子频率测量技术被广泛研究,许多基于不同原理的测频方案涌现而出,本文中将对这些测频方案进行分析和总结。

1 瞬时频率测量

瞬时频率测量(instantaneous frequency measurement, IFM)是雷达警报接收机、防静电防御和电子智能系统中的重要任务。快速的测量速度、精确的测量和大的频率测量范围对于这些应用至关重要。传统的电域 IFM 系统易受电磁干扰的影响,由于电子部件的带宽有限,通常测量范围限制在 18GHz 以内。微波光子技术可用于将 IFM 接收机的带宽扩展到数十甚至数百吉赫兹,并不受电磁干扰的影响。

1.1 基于频率-微波功率的映射

微波功率信息可以瞬时测量,通过测量微波功率并根据频率与功率的对应关系^[4-7],从而可以实现 IFM。该方法的基本原理是将未知的微波信号经电光调制转换光信号,已调信号经过两个具有不同频率相关微波功率衰耗的光学通道,经光电探测器检测出相应通道的微波信号功率,实现频率到微波功率的映射,从而建立微波功率的幅度比较函数(amplitude comparison function, ACF)。若 ACF 与特定频率范围内的微波信号频率具有单调关系,则可以实现 IFM。以参考文献[7]为例,工作原理如图 1 所示。待测微波信号经相位调制被分成两路。在上通道中,由色散引起固定的功率衰减函数。通过调节下通道中的偏振控制器来产生与上支路变化相反的功率衰减函数。图 1 中上通道与下通道的功率比函数 $f(\omega_s)$ 可表示为:

$$f(\omega_s) = \gamma \frac{\sin^2(z\beta_2\omega_s^2/2)}{\sin^2(z\beta_2\omega_s^2/2 + \psi)} \quad (1)$$

式中, γ 为常数,由系统结构决定; z 为色散链路的长度; β_2 为单模光纤的色散系数; ω_s 为微波信号的频率; ψ 为两条链路的相位差。

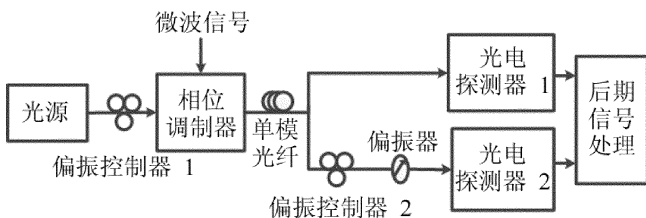


图1 基于相位调制的瞬时频率测量系统^[7]

由于两条支路所实现的功率衰减函数变化趋势相反,功率比函数在宽频带上呈准线性变化。实验中得到的测频范围为 1.6GHz ~ 24.6GHz, 测量误差在 ± 0.3 GHz 以内。该方法的优点只需要无偏置漂移的相位调制器和单个激光源,系统结构简单。

1.2 基于频率-光功率的映射

通过监测微波功率进行 IFM 的主要问题是需要高频光电探测器(photodetector, PD)和微波设备。为了避免使用这些昂贵的装置,降低测频系统的成本,可以利用光滤波器^[8-10]使得已调光信号边带的幅度随不同输入信号频率发生改变,因此通过检测光功率,便可以进行 IFM。以西南交通大学研究小组提出的实现 IFM 方案为例^[10],该方法使用了单个可调光源和两个正交光滤波器。正交滤波器的滤波响应如图 2 所示。调节可调光源的波长使已调光信号的边带位于同相滤波响应的峰值点,正交响应的 -3 dB 点。经正交滤波器对的两个信号功率与参考信号的功率相对比建立两个正交功率比函数。测频系统结构如图 3 所示。实验中得到的测频范围为 20GHz ~ 36GHz, 测量误差在 ± 0.4 GHz 以内。该方法理论上可以实现的测频范围为整个光滤波器的自由频谱程(free spectral range, FSR), 优于参考文献[8]和参考文献[9]中 FSR/2 的测量范围,并且该系统架构比参考文献[8]简单,避免使用了双光源以及波分复用器。

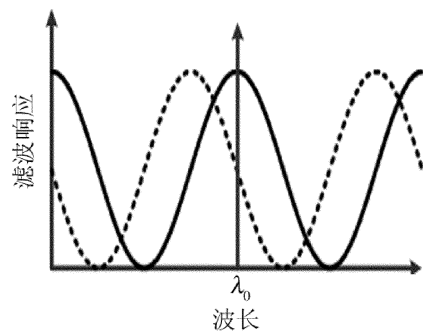


图2 正交滤波器对的滤波响应^[10]

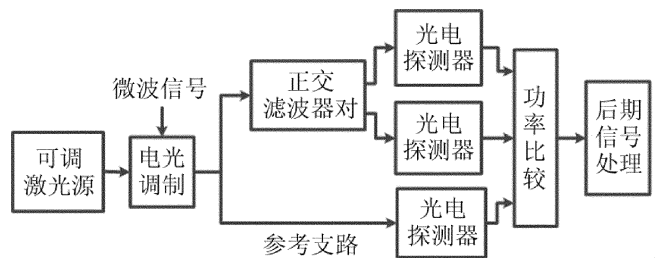


图3 采用两个正交光滤波器和单光源实现 IFM^[10]

另一种基于频率-光功率映射的实现方法是采用微波鉴频器的原理,工作原理如图 4 所示。图中 V_0 为

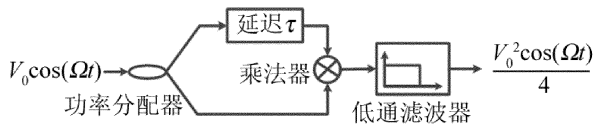


图4 鉴频器的原理图

输入信号幅值, Ω 为输入信号的频率, τ 为延迟的时间。在电域利用该方法实现测频的问题是电延迟线损耗大, 所使用的混频器工作带宽有限。利用光子学的方法对信号进行延迟混频可以克服在电域遇到的问题。乘法器可以使用两个级联马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM)^[11] 或者光学非线性效应^[12-13] 来实现, 平方律检波器可以用 PD 实现。2008 年, 墨尔本皇家理工大学研究小组利用两个级联 MZM 法, 实现了 2.2GHz ~ 3GHz 频率测量范围。测频范围由两路信号的时间延迟差 τ 决定, τ 越小测频范围越大。系统的灵敏度可以利用锁定放大技术改善, 结合高非线性光纤产生的四波混频效应可以实现 0.04GHz ~ 40GHz 的测量带宽、小于 100MHz 的测量误差以及 51dB 的动态范围^[13]。

2 光子辅助信道化

信道化接收机是一种高截获概率的测频接收机, 由于它能够直接从频域选择信号, 避免了时域重叠信号的干扰, 所以其抗干扰能力强; 同时信道化接收机的测频精度和频率分辨力不受外来信号干扰的影响, 只取决于信道频率分路器的单元宽度^[1]。在信道化接收机的一般结构中, 频率范围被细分为许多连续的信道频带。在电域中, 信道化接收机通常由一组微波滤波器构成, 结构复杂并且体积庞大。光信道化接收机的原理与电子信道化接收机类似, 基本结构如图 5 所示, 在测量带宽上有了很大的提高。该方法实现测频的关键器件是光窄带滤波器^[14-16], 它可以是相移布喇格光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 阵列、集成光学微环谐振器、法布里-珀罗标准具或者光频梳 (optical frequency combs, OFC) 和波分解复用器的组合等。为了实现滤波器中心波长、带宽可调以及提高分辨率, 可以利用受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 产生的增益谱作为光滤波器实现光信道化^[17]。由于 SBS 的增益谱带宽窄, 通常只有数十兆赫, 有很好的滤波选频作用并且 SBS 增益谱的带宽和形状可以通过调节抽运源的波形实现可调。该系统中每个信道的带宽可以实现在 50MHz ~ 90MHz 范围内可调, 可编程通道间隔在 50MHz ~ 80MHz 范围内可调。系统实现的测频范围为 2GHz ~ 18GHz。采用两个相干

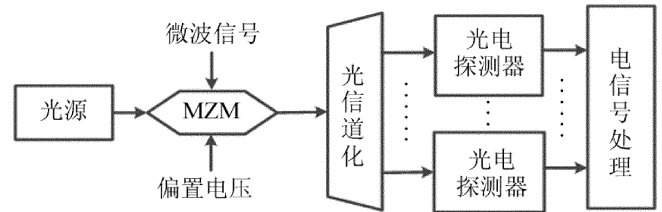


图5 光信道化接收机基本结构

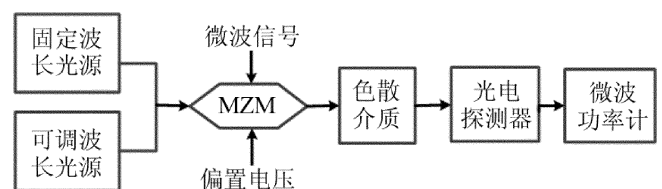
OFC 结合 SBS 效应实现信道化测量的方法^[18] 可以克服使用多个光源造成系统不稳定的问题。

3 多频测量

在实际频谱杂乱的电子战环境中, 微波信号可能包含多个频率^[19], 此时测频接收机应具备同时测量多个频率的能力, 多频测量方案能很好克服 IFM 只能测单频信号频率的问题。

3.1 基于波长扫描

波长扫描是电或光域中信号频率测量十分强大的工具, 可以实现同时测量多个单频信号的频率。光电检测后, 在较宽频率范围内的微波频谱被逐点记录。其中一种方法是扫描光源的波长^[20-21], 应强调的是扫描过程中需要精细的扫描步长, 以确保测频的高分辨率。采用波长扫描结合傅里叶余弦变换实现测频方法如图 6 所示。通过改变可调激光器的波长得到多组微波功率值。对所获的数据进行傅里叶余弦变换, 可以得到待测微波信号的频域信息^[20]。实验中可以实现对两个频率差为 15MHz 信号的鉴别, 测频范围为 0GHz ~ 19GHz。2011 年, 浙江大学研究人员在此基础上做了相应的改进, 采用单个可调激光源和无直流偏置的相位调制方式对信号进行处理, 简化了测量系统^[21]。另一种方法是采用具有固定波长的激光源, 使用光滤波器^[22-23] 对光源的波长进行扫描, 该原理可以克服光源不稳定对测量结果造成的影响。为了在光域实现对频率较为精细的扫描, 可以使用具有超窄带宽的 SBS 增益谱或损耗谱。2016 年, 悉尼大学研究人员采用在集成非线性脊型波导实现 SBS 效应的方法^[24], 构建微波光子带阻滤波器, 在不同通带内建立具有大斜率的分布式 ACF 函数, 从而实现微波信号的频率测量。实验

图6 基于傅里叶余弦变换测频系统结构图^[19]

得到的测频范围为 9GHz ~ 38GHz, 测量误差小于 1MHz。

3.2 基于时域脉冲整形的实时傅里叶变换

典型的时域脉冲整形系统由两个共轭色散元件 (即具有相等幅度但相反符号的色散) 以及放置在两个色散元件之间的电光调制器组成, 系统结构如图 7 所示, 图中 Φ_0 为光纤的色散量。该系统可以实现输出为输入信号傅里叶变换波形的功能^[25]。通过测量输出信号的时域波形并经过相应的尺度变换即可获得待测信号的频率^[26-27], 基于该原理可以实现同时测量多个单频信号的频率。由于超短脉冲的频谱宽度远远超出了现有光电探测器和示波器的观测带宽, 导致频谱分辨率差。可以利用时空对偶性, 引入由时间透镜组成的时域放大系统, 放大超短脉冲^[27]。超短脉冲时域波形被展宽, 便可用常规示波器来显示波形。实验中可以实现的测频带宽超过 20GHz, 分辨率达到 1GHz。若实验中色散匹配做到更准确并且使用较大瞳孔尺寸的时间透镜, 分辨率会有所提高。

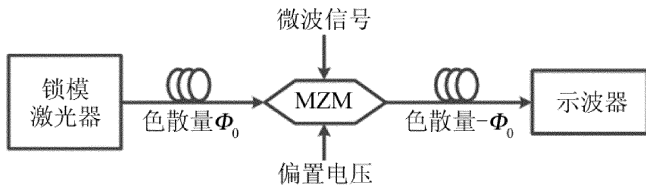


图 7 时域脉冲整形系统

4 光子模数转换技术实现测频

随着数字信号处理和模数转换技术的发展, 数字化技术被广泛应用于电子战的宽带接收机中。光子模数转换技术能充分利用数字化技术的优势, 实现宽带数字化微波频率测量。西南交通大学研究小组提出利用相移光滤波器阵列实现微波信号频率的数字化输出^[28], 实验实现了 5 位二进制编码的数字化频率输出, 测频范围为 10GHz ~ 40GHz, 频率分辨率为 3.9GHz。2012 年, 浙江大学研究人员采用双边带信号在色散介质中传播后引起微波功率衰落原理, 设置不同长度光纤引入不同色散量, 对微波功率进行量化编码^[29], 实验中实现了 4 位二进制编码的数字化频率输出, 测频范围为 0GHz ~ 17.5GHz。相比于参考文献 [28], 在相同测量精度条件下, 该方案所需的通道数大大减少, 简化了系统结构。

基于光子辅助型模数转换实现测频的方案有利用高频激光脉冲作为电子模数转换器的采样时钟, PD 端的输出信号经低速电子模数转换器采样, 最后通过频

率恢复算法得出待测微波信号的频率^[30], 实验中实现了 0GHz ~ 20GHz 的频率测量范围以及 ± 8 kHz 的测量误差。光脉冲作为采样时钟能克服电域中时间抖动的问题, 从而提高测频的精度。另一种测频原理是采用光子时间拉伸法^[31], 工作原理如图 8 所示。输入信号的时域波形被放大, 从而可以使用采样速率较低电子模数转换器对信号进行采样, 最后经电信号处理获得待测信号频率。时间拉伸倍数 M 为两次拉伸后的时域脉冲宽度与调制时的时域脉冲宽度的比值, 假设两段光纤的色散系数 D 相同, L_1 为色散光纤 1 的长度, L_2 为色散光纤 2 的长度, 则拉伸倍数 M 可以表示为:

$$M = \frac{D(L_1 + L_2)}{DL_1} = 1 + \frac{L_2}{L_1} \quad (2)$$

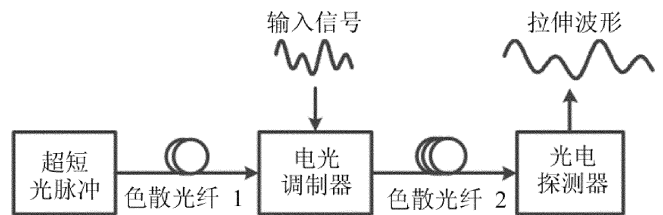


图 8 光子时间拉伸原理图

5 光子压缩感知技术实现测频

获得未知信号频谱信息最直观的方法是将其数字化, 然后在数字域中实现傅里叶变换。由于目前模数转换器的采样率有限, 因此很难直接对大带宽的信号进行数字化。但根据压缩采样理论, 可以以亚奈奎斯特采样率数字化频域稀疏的信号, 并用稀疏重建算法恢复原始信号^[32]。采用光子压缩感知测量信号频率的优点是克服了可恢复信号带宽受到电混频器带宽限制的问题。结合光子技术实现混频的方法有电光调制器级联法^[33-34]、空间光调制法^[35]、正交调制器法^[36]以及多通道调制转换法^[37]。2011 年, 美国海军实验室采用电光调制器级联法, 首次利用光子压缩感知技术实现对 1.1GHz 信号的重构^[33]。2015 年, 清华大学研究人员采用正交调制器法, 成功实现对频率范围为 0.5GHz ~ 5GHz 的雷达脉冲流用 520MHz 采样速率的模数转换器精确恢复^[36]。光子时间拉伸技术应用于压缩感知可以提高系统测量带宽并且不降低信号恢复的精度, 其原理如前面第 4 节中所述, 光电转换后的电信号在时域上得到了展宽, 从而降低了系统中模数转换器的速率^[38]。

6 新技术展望

上面所述的微波频率测量方案都使用分立光学元

器件。集成光学技术^[39]可以将光电器件集成在尺寸为 1mm^2 或更小的单片芯片上,大大减少系统占用体积,降低功耗,减小外界因素对系统的影响,从而提高测频的精度。2013年,Twente大学研究人员首次提出使用集成光环型谐振器实现测频的方案^[40]。谐振器两个光学通道之间存在互补频率响应,利用该特性可以实现相位调制到强度调制的转换,建立相应的ACF函数,实现微波信号的频率测量。2015年,悉尼大学研究小组采用在硅基波导中实现四波混频效应的方法^[41],通过检测新频率成分处的微波功率,计算出微波信号频率。实验中得到了 $0\text{GHz} \sim 40\text{GHz}$ 的测频范围,测量误差均方根为 318.9MHz ,仅为测量带宽的 0.8% 。随着集成光学技术和集成光学器件^[42]的发展,基于光子学的微波信号频率测量系统将在芯片上实现,并拥有更卓越的性能。

7 结束语

介绍了近十几年结合光子学实现微波信号频率测量的方法,将这些方法分为五大类进行介绍分析,并对基于集成光学的微波信号频率测量技术进行了探讨。相比于电子领域测频方案,基于光子学的微波信号频率测量方案具有瞬时带宽大、损耗低、抗电磁干扰等优点。目前基于光子学的微波信号频率测量处于实验到工程实际应用的转型阶段,未来几年具有广阔的应用前景。随着信号处理的深入应用和电子技术的迅猛发展,电子战环境日益复杂,电子侦察需要不断发展以适应日益复杂的电磁环境,基于光子学的微波信号频率测量方案也将不断创新,以满足电子侦察的发展需求。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y Sh. The principle of radar electronic warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:20-50(in Chinese).
- [2] LI W L, HE Z A, ZHOU T. Superheterodyne receiver based on optical bandpass sampling[J]. Electronic Information Confrontation Technology, 2013, 28(4):39-42(in Chinese).
- [3] ZOU X H, LU B, PAN W, *et al.* Photonics for microwave measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(5):711-734.
- [4] NGUYEN L V T, HUNTER D B. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10):1188-1190.
- [5] ZOU X H, PAN Sh 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.
- [6] 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.
- [7] TU Zh Y, WEN A J, GAO Y Sh, *et al.* A photonic technique for instantaneous microwave frequency measurement utilizing a phase modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(24):2795-2798.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] 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.
- [12] BUI L A, MITCHELL A. Amplitude independent instantaneous frequency measurement using all optical technique[J]. Optics Express, 2013, 21(24):29601-29611.
- [13] EMAMI H, ASHOURIAN M. Improved dynamic range microwave photonic instantaneous frequency measurement based on fourwave mixing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(10):2462-2470.
- [14] WANG W Sh, 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.
- [15] 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.
- [16] WIBERG A O J, ESMAN D J, LIU L, *et al.* Coherent filterless Wideband microwave/millimeter-wave channelizer based on broadband parametric mixers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20):3609-3617.
- [17] ZOU X H, LI W, 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.
- [18] XU W Y, ZHU D, PAN Sh L. Coherent photonic radio frequency channelization based on dual coherent optical frequency combs and stimulated Brillouin scattering[J]. Optical Engineering, 2016, 55(4):046106.
- [19] 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.
- [20] VIDAL B, MENGUAL T, MARTI J. Photonic technique for the measurement of frequency and power of multiple microwave signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11):3103-3108.
- [21] WANG Y, CHI H, ZHANG X M, *et al.* Photonic approach for microwave spectral analysis based on Fourier cosine transform[J]. Optics Letters, 2011, 36(19):3897-3899.
- [22] RÜGELAND 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.
- [23] GUO H L, XIAO G Zh, 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.
- [24] 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.
- [25] CHI H, YAO J P. Symmetrical waveform generation based on temporal pulse shaping using amplitude-only modulator[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(7): 415-417.
- [26] SAPERSTEIN R E, PANASENKO D, FAINMAN Y. Demonstration of a microwave spectrum analyzer based on time-domain optical processing in fiber[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 501-503.
- [27] DUAN Y H, CHEN L, ZHOU H D, *et al.* Ultrafast electrical spectrum analyzer based on all-optical Fourier transform and temporal magnification[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7520-7529.
- [28] 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 Photonics Journal*, 2013, 5(5): 5501906.
- [29] CHEN Y, YANG B, CHI H, *et al.* Photonic instantaneous frequency measurement with digital output based on dispersion induced power fading functions[J]. *Optics Communications*, 2013, 292(4): 53-56.
- [30] MA Y X, LIANG D, PENG D, *et al.* Broadband high-resolution microwave frequency measurement based on low-speed photonic analog-to-digital converters[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2355-2368.
- [31] BHUSHAN A S, COPPINGER F, JALALI B. Time-stretched analogue-to-digital conversion[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(9): 839-841.
- [32] TROPP J A, LASKA J N, DUARTE M F, *et al.* Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(1): 520-544.
- [33] NICHOLS J M, BUCHOLTZ F. Beating Nyquist with light: a compressively sampled photonic link[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7339-7348.
- [34] CHI H, MEI Y, CHEN Y, *et al.* Microwave spectral analysis based on photonic compressive sampling with random demodulation[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4636-4638.
- [35] VALLEY G C, SEFLER G A, SHAW T J. Compressive sensing of sparse radio frequency signals using optical mixing[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4675-4677.
- [36] GUO Q, LIANG Y H, CHEN M H, *et al.* Compressive spectrum sensing of radar pulses based on photonic techniques[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4517-4522.
- [37] NAN H, GU Y T, ZHANG H M. Optical analog-to-digital conversion system based on compressive sampling[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 67-69.
- [38] CHI H, CHEN Y, MEI Y, *et al.* Microwave spectrum sensing based on photonic time stretch and compressive sampling[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 136-138.
- [39] LIU X D. Integrated optics and its applications [J]. *Laser Technology*, 1981, 5(2): 1-7 (in Chinese).
- [40] MARPAUNG D. On-chip photonic-assisted instantaneous microwave frequency measurement system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(9): 837-840.
- [41] PAGANI M, MORRISON B, ZHANG Y, *et al.* Low-error and broadband microwave frequency measurement in a silicon chip[J]. *Optica*, 2015, 2(8): 751-756.
- [42] SONG M G, CAO L Q, LIU F M, *et al.* Optimized design of grating coupling packaging structure on silicon substrate [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 479-483 (in Chinese).