微波光子传感技术研究进展综述

王 彬[1,2,3],张伟锋[1,2,3],赵双祥[1,2,3,4],樊昕昱[4]

(1. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所,北京 100081; 2. 北京理工大学重庆创新中心,重庆 401120; 3. 新体制民用雷达重庆市重点实验室,重庆 401120; 4. 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘 要: 微波光子学是一门研究光与微波相互作用的新型交叉学科,旨在利用现代光学技术实现高频宽带微波信号产生、传输、处理和测量. 其中,微波光子传感是微波光子学一个重要的研究领域,它采用光学传感器实现温度、应变、压力等传感参量光域感知,基于微波光子技术实现光域传感信息到微波域的线性映射和转换,结合微波信号处理技术实现传感信号解调,具有传感精度高、测量速度快等显著优势. 本文系统性地回顾了微波光子传感技术最新研究进展,介绍了各类微波光子传感技术的基本工作原理,并展望了未来的研究方向和发展趋势.

关键词: 微波光子传感器; 信号产生; 微波光子滤波; 频谱整形-波长时间映射; 分布式/准分布式传感; 集成微波光子

中图分类号: TN29; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)04-0769-13

电子学报 URL:http://www.ejournal.org.cn **DOI:**10.12263/DZXB.20211186

Recent Progress in Microwave Photonic Sensors

WANG Bin[1,2,3], ZHANG Wei-feng[1,2,3], ZHAO Shuang-xiang[1,2,3,4], FAN Xin-yu[4]

(1. *Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing* 401120, *China*;
3. *Chongqing Key Laboratory of Novel Civilian Radar, Chongqing* 401120, *China*;
4. *State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: Microwave photonics is a multidisciplinary field that studies the interaction between microwave and optical waves for the generation, transmission, processing, and measurement of wideband microwave signals by means of photonics. Microwave photonic sensors are one of the active sub-fields that uses optical sensors to probe the information of temperature, strain, pressure, etc. and microwave photonic techniques to extract the sensing information accurately, providing unique advantages of high resolution and high speed. This paper comprehensively reviews the recent progress in microwave photonic sensors, introduces the basic principle of microwave photonic sensing, and discusses the potential research directions in the future.

Key words: microwave photonic sensors; signal generation; microwave photonic filter; spectral-shaping and frequency-to-time mapping; distributed/ quasi-distributed sensing; integrated microwave photonics

1 引言

随着物联网产业的不断发展和“智慧城市”建设的快速推进,传感技术作为一种重要的信息感知手段,成为当前国内外研究热点方向之一. 目前,现有传感技术根据传感机理不同可以分为光学传感技术和电学传感技术两类. 其中,光学传感技术以光信号作为传感信息载体,以各类光子器件作为传感单元,通过测量外界物理参量引起的光信号特征参数(波长、强度、相位、偏振等)变化,可实现温度、应变、压力、折射率、振动、角速度、磁场强度等多种物理参量传感,具有体积小、质量轻、抗电磁干扰、耐腐蚀、复用能力强等诸多优点,在边界安防、航天航空、能源电力、石油化工、工业制造、智能结构健康监测等领域得到广泛应用.

传统光学传感技术通过在光域测量光传感信号波长漂移或者功率变化,实现传感信息解调. 其中,光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)作为一种常用

收稿日期:2021-08-31;修回日期:2022-01-18;责任编辑:孙瑶
基金项目:国家重点研发计划(No.2018YFE0201801);重庆市自然科学基金(No.cstc2020jcyj-msxmX0673);国家自然科学基金(No.62005018)

的光信号分析仪器，可以直接获得光学传感器的频谱响应信息，操作简单，但测量精度（0.02 nm）和测量速度（<100 Hz）受限，且造价非常昂贵[1]. 采用边缘光滤波器（Edge Optical Filter，EOF）作为波长解调器，可以将光波长漂移线性地转化为光功率变化，从而避免波长扫描过程[2]. 该方案可以显著提高光学传感器的测量速度（>1 kHz），但是其传感精度较低，光源功率抖动等因素会引入较大的波长测量误差. 此外，基于线性扫频光滤波器也可以实现光学传感器解调[3]，通过测量扫频过程中光功率变化，可以实现级联多个传感单元的准分布式测量，但是传感精度、测量速度和测量范围等性能指标之间仍然存在相互制约关系. 因此，如何实现高速高精度光学传感仍然是一个亟待解决的问题.

微波光子学是一门研究光与微波相互作用的新型交叉学科，旨在利用现代光学技术实现高频宽带微波信号产生、传输、处理和测量，具有高频、宽带、抗电磁干扰、并行处理等显著优势. 其中，微波光子传感是微波光子学一个重要的研究领域[4,5]. 它利用各类新型光学器件实现传感信息光域感知，结合微波光子技术实现光域传感信息到微波信号物理参量变化的映射和转换. 将低精度的光波长漂移和光功率变化测量转化为高精度的微波信号频率、相位和延时测量，结合精密微波测量仪器和精细微波信号处理技术，可显著提高光学传感系统的传感精度和测量速度.

本文将详细介绍微波光子传感技术最新研究进展，主要聚焦基于微波光子信号产生的传感技术、基于微波光子滤波的传感技术、基于频谱整形-波长时间映射的传感技术、分布式/准分布式微波光子传感技术，以及集成微波光子传感技术，最后对微波光子传感技术未来的研究方向与发展趋势进行讨论和展望.

2 基于微波光子信号产生的传感技术

基于微波光子信号产生的传感技术旨在利用微波光子技术将光传感信号波长、相位等参数变化转换为微波信号频率变化，从而提升传感精度和测量速度. 目前，根据传感机理不同，它可以分为外差拍频和光电振荡器（Opto-Electronic Oscillator，OEO）两类.

2.1 基于外差拍频的微波光子传感技术

图 1 为外差拍频原理示意图. 携带传感信息的光信号 $E_s\cos(\omega_s t+\varphi_S)$ 和参考光信号 $E_R\cos(\omega_R t+\varphi_R)$ 在光耦合器中干涉，经过光电探测器接收后产生携带传感信息的微波信号，可以表示为

$$I_{RF}(t)=A\cos[(\omega_S-\omega_R)t+(\varphi_S-\varphi_R)] \tag{1}$$

其中，A 为常数；ω_s，ω_R，φ_S，φ_R 分别为传感光信号和参考光信号的频率和相位. 由式（1）可知，当传感光信号频率（波长）发生改变时，外差拍频产生的微波信号也会产生相同的频率变化量. 在 1550 nm 波段，采用光学方法（例如 OSA）实现的光频率（波长）测量精度一般为 GHz（pm）量级，而外差拍频产生的微波信号频率测量精度可以达到 1 kHz 以下，因此可以显著提高光学传感器的传感精度.

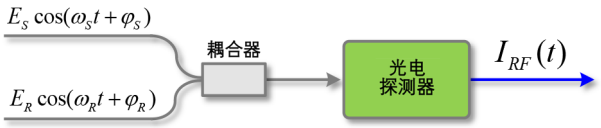


图 1 外差拍频原理示意图

1993 年，韩国的 Kim 等人提出基于偏振光纤激光器和外差探测的横向压力传感技术[6]. 在该系统中，当传感光纤受到横向压力影响时，其双折射会发生变化，从而改变激光器在两个正交偏振模式下的谐振波长，因此通过测量偏振模式拍频（Polarization Mode Beat Frequency，PMBF）可以实现横向压力传感. 随后，该课题组进一步利用 90° 偏振态旋转熔接结构提升偏振光纤激光器对温度和应变的响应度[7]，实现了 30 kHz/(°C·cm) 和 43 kHz/με 的温度和应变传感灵敏度.

2001 年，英国南安普顿大学 Hadeler 等人提出基于双纵模分布式反馈（Distributed FeedBack，DFB）激光器的温度/应变同时传感技术[8]，利用纵模拍频（Longitudinal Mode Beat Frequency，LMBF）和 PMBF 对温度和应变响应度的不同，构建二维传感参量矩阵，实现了 0.2 °C 和 15 με 的温度和应变传感精度.

2007 年，浙江大学何赛灵教授团队提出基于分布式布拉格反射（Distributed Bragg Reflector，DBR）光纤激光器和外差拍频技术的温度/应变同时传感系统[9]，工作原理如图 2 所示. 其通过同时监测 DBR 激光器的 PMBF 变化和波长漂移，进一步将温度/应变传感精度提升至 0.05 °C 和 9.3 με. 随后，该研究团队通过深入研究 DBR 激光器和光纤激光器中正交偏振模式的演变机理以及不同物理参量对传感光纤特征参数的作用机制，提出了高精度横向压力测量、弯曲测量等多种光学传感机理[10~12].

2008 年，大连理工大学关柏鸥教授团队基于双偏振 DBR 激光器结构和外差拍频技术的高灵敏度横向压力传感系统[13]，通过优化光学传感器受压角度和长度等参数，实现了 10 GHz/(N/mm) 的传感灵敏度. 随后，该研究团队通过研究不同物理参量对 DBR 激光器中传感光纤双折射的影响机制，进一步提出了基于外差拍频技术的位移传感、电流传感、超声波探测等多种高精度传感系统[14~16].

2010 年，南京大学陈向飞教授团队提出基于多纵

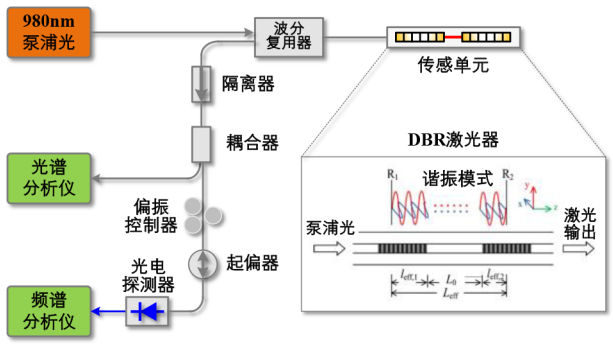


图2　基于DBR激光器和外差拍频的光学传感系统原理示意图[10]

模光纤激光器和外差拍频技术的高精度光学传感机理[17,18]. 光纤激光器不同纵模之间相互干涉产生等频率间隔的拍频信号,通过测量拍频信号的频率变化,可以获得温度、应变等传感信息,温度和应变分辨率分别为0.2 ℃和3.6 με. 随后,该研究团队进一步优化了信号解调和处理过程,大幅提升了光学传感器的测量速度,实现了高频振动信号的高精度传感[19,20]. 此外,他们还提出了基于波分复用的多点式光学传感系统,通过采用波分复用器(Wavelength Division Multiplexers, WDM)构成双波长的多纵模光纤激光器,实现了两个传感单元的同时解调[21].

2012年,华中科技大学孙琪真教授团队提出了基于双波长光纤激光器结构的高精度液位传感器[22],通过测量传感相移光栅(Phase-Shifted Fiber Bragg Grating, PS-FBG)和参考PS-FBG之间的频率变化,在1.5 mm测量范围内实现了2.12×10^7 MHz/m的超高灵敏度. 2013年,荷兰特文特大学Pollnau等人提出了基于集成双波长DFB激光器的微粒尺寸传感系统,通过测量激光器双纵模之间的频率差[23],实现了直径为1~20 μm的微粒尺寸测量,测量精度可达500 nm. 2015年,重庆大学朱涛教授团队提出了基于光纤环形激光器结构的高精度磁场传感系统,通过测量外界磁场导致的PMBF变化[24],实现了0~437 Oe测量范围内7.09 kHz/Oe的传感灵敏度. 2015年,南京大学张旭苹教授团队提出了基于多波长布里渊光纤激光器拍频的高灵敏度温度传感系统[25],通过采用12阶斯托克斯光作为传感光信号,产生的拍频信号温度传感响应度提高了12倍(13.08 MHz/℃).

综上所述,基于外差拍频的微波光子传感技术通过将低精度的光波长测量转换为高精度的微波频率测量,具有传感精度高、测量速度快、结构简单等显著优势.

2.2　基于光电振荡器的微波光子传感技术

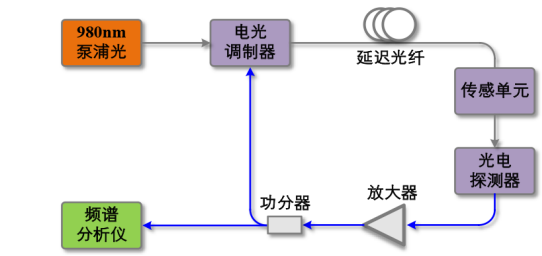
光电振荡器是光学与电学完美结合的一种器件,它以低损耗光纤作为储能媒介,通过构建超高品质因数光电融合谐振环路,可实现超低相位噪声微波信号光学合成[26~28]. OEO除了作为信号源外,也是一种超高精度光学传感装置[29],其工作原理如图3(*a*)所示. 目前,基于OEO的微波光子传感系统可以分为以下两类.

第一类采用经典OEO结构,通过测量OEO腔长的变化从而获得传感信息. 如图3(*b*)所示,OEO的输出信号包含一系列离散的谐振模式,谐振频率可以表示为

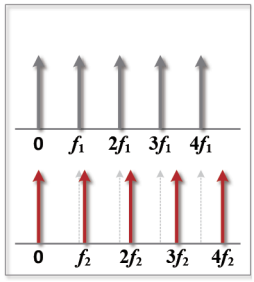
$$f_k = kf_1 = k\frac{c}{nL} \tag{2}$$

其中,k为正整数,c为真空中光速,n为光纤纤芯的有效折射率,L为OEO腔长. 当外界物理参量引起n或者L发生变化时,OEO的谐振频率也会随之改变. 因此,通过测量OEO谐振频率变化,可以准确地获得待测物理量信息.

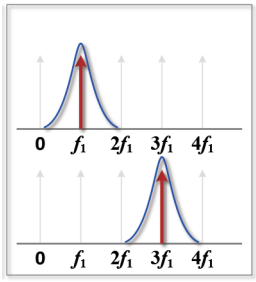
第二类采用基于微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)的OEO结构. 如图3(*c*)所示,MPF既作为选频器件,同时也是传感单元. 当MPF中心频率变化时,OEO输出微波信号频率也会随之改变. 因此,基于上述传感机理,也可以实现高精度光学传感.



(*a*)　原理示意图



(*b*)　OEO腔长变化



(*c*)　OEO中滤波器中心频率变化

图3　基于光电振荡器(OEO)的微波光子传感系统

基于OEO腔长测量传感机理,国内外研究者提出了一系列高精度光学传感系统. 2010年,法国SATIE实验室Journet等人率先提出基于OEO的高精度折射率传感器[30]. 如图4所示,他们将待测溶液置于OEO环路中,当溶液折射率发生变化时,OEO腔长也会随之改变. 通过测量OEO输出微波频率变化,实现了10^{-3}的折射率传感精度.

2014年,韩国国防科学研究所Lee等人首次利用

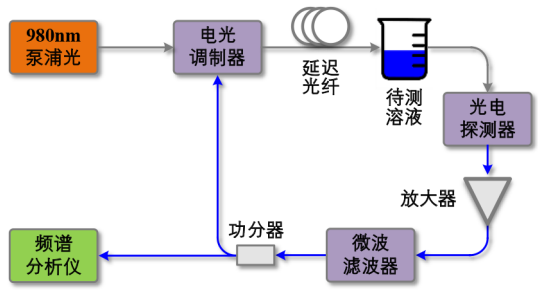


图4 基于OEO的折射率传感系统原理示意图[30]

OEO准确测量了声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)中的声速[31],测量结果为(4.26±0.04)×10^3 m/s. 同年,西南交通大学邹喜华教授团队提出了基于非相干光源的OEO系统[32],并将其应用于光程测量,实现了–480 kHz/cm的传感灵敏度,理论光程分辨率可以达到纳米量级. 浙江大学金晓峰教授团队提出了基于OEO的高精度温度传感系统[33],采用注入锁定技术消除OEO起振时的频率抖动,在20~240 ℃测量范围内实现了0.12 ℃的温度分辨率. 2017年,该研究团队提出了基于OEO和双输出马赫-曾德尔调制器(Dual-Output Mach-Zehnder Modulator, DOMZM)的高精度光学振动传感系统[34]. 如图5所示,该系统利用DOMZM的两个输出端口和保偏光纤耦合器构成马赫-曾德尔干涉仪结构(作为传感单元),利用光电探测器实现光相位变化到微波相位变化的线性转换,结合高精度微波鉴相技术,实现了0.21 μrad/√Hz(@10 kHz)的振动传感灵敏度.

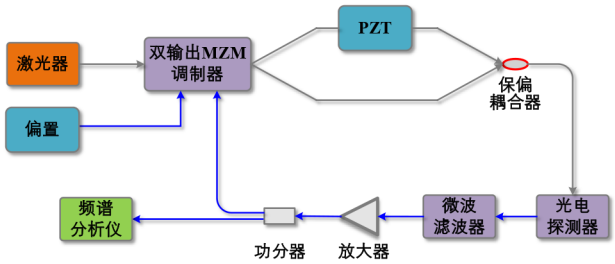
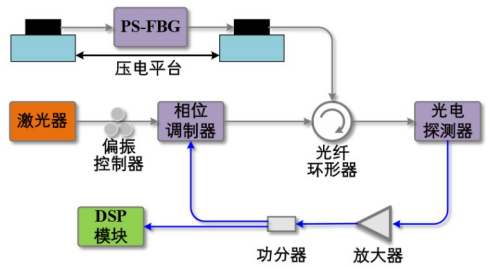


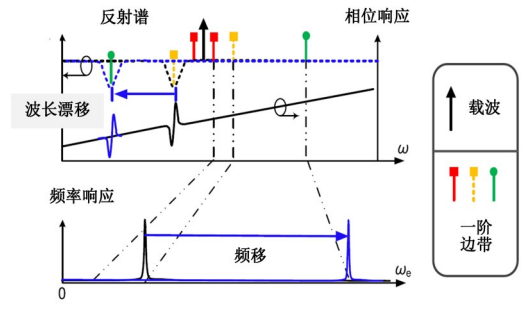
图5 基于OEO的高精度光学振动传感系统原理示意图[34]

2017年,电子科技大学邱琪教授团队提出了基于双OEO环路的温度不敏感应变传感系统[35],实现了600 με测量范围内0.3 με的应变传感灵敏度. 2018年,北京交通大学王目光教授团队提出了基于OEO和萨格纳克干涉仪的高精度光学角速度传感系统[36],通过测量萨格纳克效应导致的OEO谐振频率漂移,实现了51.8 kHz/(rad/s)的角速度传感灵敏度. 2020年,该研究团队提出基于OEO和法拉第旋光效应的高精度电流传感系统[37],在0~2.5 A测量范围内实现了152.5 kHz/A的电流传感灵敏度.

除了基于腔长测量的OEO传感系统外,基于微波光子滤波器(Microwave Photonic Filter, MPF)结构的OEO传感技术也引起了广泛的关注. 2012年,加拿大渥太华大学姚建平教授团队提出了基于OEO和相移光纤光栅(Phase-Shifted Fiber Bragg Grating, PS-FBG)的高精度应变传感系统[38]. 如图6(*a*)所示,PS-FBG既作为应变传感单元,同时也和激光器、相位调制器、光电探测器等器件共同构成一个窄带MPF,用于OEO选频. 如图6(*b*)所示,当外加应变导致PS-FBG反射波长发生变化时,MPF的中心频率也随之改变. 因此,通过测量OEO输出信号频率变化,可以准确地测量施加的应变大小. 2013年,该研究团队提出了基于保偏PS-FBG的双频率振荡OEO传感系统,实现了温度不敏感的横向负载测量[39]. 随后,他们进一步提出了光电互耦OEO结构来提高传感系统的频率稳定度[40],最终实现了9.735 GHz/(N/mm)的传感灵敏度和3.1566×10^{-4} N/mm的横向负载测量分辨率.



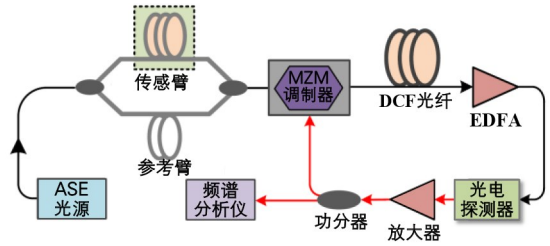
(*a*) 基于OEO和相移光纤光栅(PS-FBG)的应变传感系统原理示意图



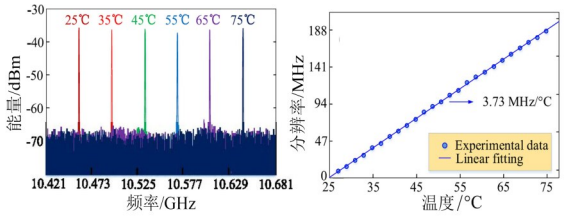
(*b*) 基于相位调制-强度调制转换的微波光子滤波器(MPF)原理示意图

图6 基于微波光子滤波器结构的OEO传感技术[38]

2016年,姚建平教授团队基于马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)结构和色散元件构建了有限冲激响应的窄带MPF,并构建了高精度OEO温度传感系统[41],其工作原理如图7(*a*)所示. 图7(*b*)给出了温度传感实验结果. 当MZI的臂长差受到温度影响时,OEO的输出频率也会随之发生改变,该方案实现了3.73 MHz/℃的温度传感灵敏度和0.015 ℃的温度测量分辨率.



（a）　原理示意图



（b）　温度传感实验结果

图 7　基于 OEO 和马赫-曾德尔干涉仪的温度传感系统[41]

2017 年，北京交通大学王目光教授团队提出了基于保偏光纤光栅 F-P 滤波器的双频 OEO 传感系统，实现了温度和应变同时传感[42]. 随后，他们通过设计不同结构的光纤光栅 F-P 滤波器，分别实现了磁场强度、折射率等传感系统[43,44]. 2019 年，重庆大学朱涛教授团队提出了基于受激布里渊散射（Stimulated Brillouin Scattering，SBS）的 OEO 温度传感系统[45]，利用 OEO 中的模式竞争效应，实现了应变不敏感的温度传感，温度传感灵敏度和分辨率分别为 1 MHz/°C 和 0.5 °C.

基于 OEO 的微波光子传感技术采用 OEO 作为光波与微波之间信号转换的桥梁，结合高精密微波测量仪器和高精细微波信号处理技术，可显著提升光学传感系统测量精度和速度，同时降低传感系统成本.

3　基于微波光子滤波的传感技术

微波光子滤波器利用光域信号处理技术实现微波滤波功能，具有大带宽、可重构等独特优势. 图 8 给出微波光子滤波器的工作原理示意图，其主要包含光源、电光调制器、光信号处理单元和光电探测器等光电器件. 微波光子滤波器除了作为关键微波信号处理器件外，也可用于光学传感器解调. 利用矢量网络分析仪测量微波光子滤波器的幅度和相位响应，可以准确地获得外界物理参量信息，从而实现高精度光学传感.

2009 年，浙江大学何赛灵教授团队提出基于双抽头微波光子滤波器的光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）应变传感系统[46]. 如图 9 所示，FBG 反射的传感光信号经过电光调制器后，在萨格纳克环中沿顺时针和逆时针两个方向传播，随后被线性啁啾光栅

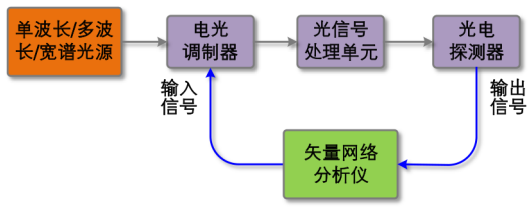


图 8　微波光子滤波器原理示意图

（Linearly-Chirped Fiber Bragg Grating，LCFBG）反射，经过光电转换后构成双抽头微波光子滤波器. 当外加应变导致传感 FBG 反射波长变化时，由于 LCFBG 的色散效应，微波光子滤波器两个抽头信号之间的时延差会随之改变. 因此，测量微波光子滤波器的响应特性，可以准确地获得传感 FBG 的应变信息.

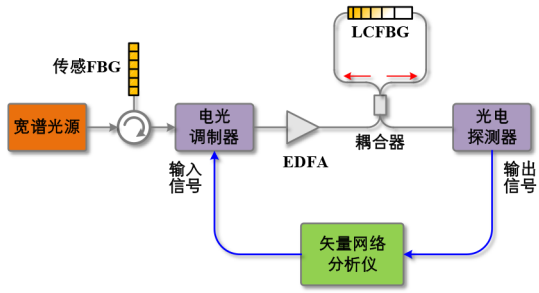


图 9　基于双抽头微波光子滤波器的传感系统原理示意图[46]

基于双抽头微波光子滤波器结构，国内外研究者提出了一系列高精度光学传感系统. 2015 年，美国克莱姆森大学 Huang 等人提出了基于蓝宝石光纤和双抽头微波光子滤波器结构的高温传感系统[47]，温度测量范围可达 1400 °C，温度分辨率为 0.5 °C. 同年，暨南大学冯新焕教授团队提出了基于微纳光纤光栅和双抽头微波光子滤波器结构的高精度折射率传感系统[48]，并将其成功应用于 DNA 分子杂交探测. 2016 年，南京师范大学汪弋平教授团队提出了基于 FBG 和双抽头微波光子滤波器结构的横向压力传感系统[49]，实现了 2.5 MHz/N 的传感灵敏度. 2017 年，瓦伦西亚理工大学 Capmany 等人提出了基于多芯光纤 FBG 和双抽头微波光子滤波器结构的高精度弯曲传感系统[50]，传感灵敏度可达 92 MHz/m^{-1}. 2020 年，香港理工大学吕超教授团队提出了基于聚合物光纤 FBG 和双抽头微波光子滤波器结构的高精度湿度传感系统[51]，测量分辨率比传统光波长测量方案提高了两个数量级.

除了基于双抽头微波光子滤波器结构的光学传感系统外，利用多抽头结构形成带通微波光子滤波器也被广泛应用于高精度光学传感系统中. 2014 年，中科院半导体所李明研究员团队提出了基于多抽头带通微波光子滤波器结构的高分辨率光程测量系统[52]. 如图 10 所示，该方案采用 MZI 结构进行光谱切割，结合色散补

偿光纤构成带通微波光子滤波器，通过测量微波光子滤波器中心频率变化，可以准确地测量MZI两臂光程差的变化，理论测量分辨率可以达到皮米量级.

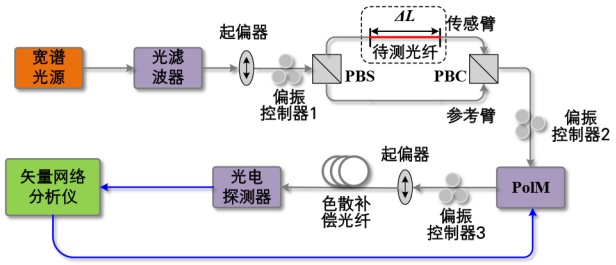


图10 基于微波光子滤波器的光程测量系统原理示意图[52]

2017年，南京师范大学汪弋平教授团队提出了基于多抽头带通微波光子滤波器结构的高精度光学压力传感器[53]. 该方案采用一个法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer，FPI)同时实现压力感知和光谱切割功能，在0~4 MPa范围内实现了86 MHz/MPa的压力传感灵敏度. 同年，加拿大麦吉尔大学Chen等人利用两个具有不同光谱切割特性的FBG法布里-珀罗谐振腔作为传感单元，基于频分复用机理，实现了多点温度/应变传感[54]. 2019年，澳大利亚悉尼大学Yi等人提出了基于往返光谱切割技术的高精度光程差测量系统[55]，光程差测量灵敏度和分辨率分别为5.56 GHz/mm和124 μm.

近年来，随着各类新型光学技术和信号处理方法的提出，微波光子滤波器传感系统的性能指标得到进一步提升. 例如，2017年，华中科技大学舒学文教授团队通过引入游标效应[56]，显著提升了微波光子滤波器传感系统的传感灵敏度. 2021年，西南交通大学邹喜华教授团队首次将机器学习算法引入微波光子滤波器传感系统中[57]，显著提升了传感信号的解调精度和速度. 同年，南方科技大学邵理阳教授团队提出了网络化的微波光子传感架构[58]，基于单一传感系统实现了温度、扭曲、横向压力等多种物理参量的同时测量.

4 基于频谱整形-波长时间映射的微波光子传感技术

频谱整形-波长时间映射(Spectral-Shaping and Wavelength-To-Time Mapping，SS-WTTM)是另一种实现高速高精度光学传感的技术. 它通过利用光学色散元件(例如光纤、线性啁啾光栅等)实现光波长域(频域)信息到时域信息的线性映射和转换，结合宽带数据采集和精细信号处理技术，可显著提升光学传感系统的测量速度和分辨率.

图11给出了SS-WTTM的原理示意图. 当脉冲信号$g(t)$入射到色散元件中，输出信号的时域波形[59]可以表示为

$$y(t)=g(t)*\exp\left(\mathrm{j}\frac{t^2}{2\ddot{\Phi}}\right)\approx\exp\left(\mathrm{j}\frac{t^2}{2\ddot{\Phi}}\right)\times G(\omega)\big|_{\omega=t/\ddot{\Phi}} \tag{3}$$

其中，$\ddot{\Phi}$为色散元件的色散量，并且满足时域夫琅禾费衍射条件：

$$\left|\Delta t_0^2/2\ddot{\Phi}\right|\ll 1 \tag{4}$$

其中，Δt_0为输入脉冲信号宽度. 由式(3)可知，输出信号$y(t)$的时域波形反映了输入信号$g(t)$的频谱信息. 因此，测量$y(t)$可以准确获得光学传感单元的频谱响应，从而实现高精度光学传感.

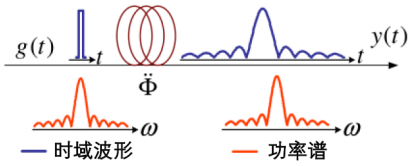


图11 频谱整形-波长时间映射原理示意图[59]

2004年，美国加州大学洛杉矶分校Jalali等人提出了基于SS-WTTM的气体传感系统[60]，实现了CO等气体吸收谱测量. 2010年，加拿大渥太华大学姚建平教授团队提出了基于SS-WTTM的高速高精度FBG传感系统[61]，通过校正色散补偿光纤(Dispersion-Compensated Fiber，DCF)的高阶色散效应，实现了48.6 MHz的测量速度和0.87 με的应变传感精度. 随后，该研究团队进一步提出了基于SS-WTTM和干涉时域光谱测量技术的高精度FBG传感系统[62]，将应变测量精度提高至0.48 με. 此外，该研究团队还分别提出了基于LCFBG和随机光纤光栅(Random Fiber Bragg Grating，R-FBG)的线性啁啾信号和随机信号产生机理[63~65]，结合脉冲压缩技术，进一步将应变传感精度提升至0.25 με，并且利用光纤光栅不同偏振态的反射光谱对温度和应变响应度的不同，通过构建二维传感参量矩阵，实现了温度和应变同时传感.

2016年，上海交通大学邹卫文教授团队基于高性能锁模激光器(Mode-Locked Laser，MLL)的超高速FBG应变传感系统[66]，测量速度可达201 MHz. 2019年，阿根廷CNEA实验室Fernández等人提出了基于SS-WTTM和高斯光滤波器的高性能FBG传感器解调系统[67]，温度/应变测量速度可达264 MHz. 2021年，北京交通大学延凤平教授团队结合SS-WTTM解调技术和各类新型的光学传感单元(例如单模-两模-单模光纤结构等)[68,69]，实现了温度不敏感的高精度应变传感，测量速度可达100 MHz，应变传感响应度为0.3 ps/με，应变/温度交叉敏感系数为0.53 με/°C.

基于SS-WTTM的微波光子传感技术可实现超高的传感速度(数十兆赫兹),结合脉冲压缩等数据处理技术可实现高精度传感,适用于超高速瞬态过程实时动态监测.

5　分布式/准分布式微波光子传感技术

分布式/准分布式微波光子传感技术通过利用时分、频分、波分等复用技术,可实现全分布式或者准分布式(多点式)高精度光学传感,在智能结构健康监测等领域具有广泛应用.

2013年,美国密苏里科技大学Huang等人提出了微波光子辅助的准分布式FPI传感系统[70,71],通过测量FPI传感阵列的时域响应,实现了3个FPI传感单元的准确定位和高精度应变传感. 同年,瓦伦西亚理工大学Capmany等人提出了基于多抽头MPF和长FBG的准分布式光学传感系统[72],其工作原理如图12所示,利用矢量网络分析仪测量MPF的S_{21}响应曲线,经过反傅里叶变换(Inverse Fourier Transform,IFT)后获得系统时域响应以及各个抽头信号的时延量,从而实现长FBG上受热点的准确定位,空间分辨率高达0.5 mm.

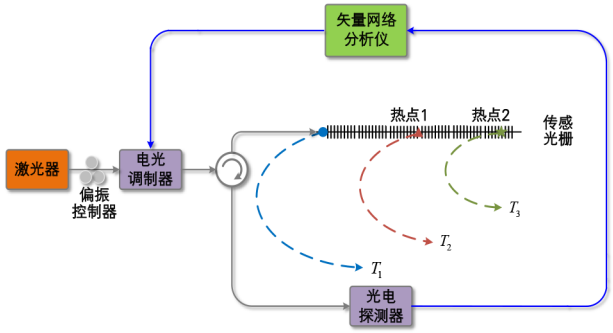


图12　基于多抽头微波光子滤波器的准分布式光纤光栅传感系统工作原理示意图[72]

基于多抽头MPF结构,华中科技大学刘德明教授团队利用匹配光滤波器将FBG反射光波长漂移转换为光功率变化,实现了基于FBG阵列的准分布式应变传感[73]. 2016年,西班牙巴仑西亚理工大学Hervás等人提出基于KLT算法的数据处理方法[74],大幅提升了MPF准分布式传感系统的测量速度. 2021年,华中科技大学夏历教授团队提出了基于MPF和频分复用技术的准分布式FPI温度和应变传感系统[75],实现了4个FPI传感单元的同时解调.

除了基于MPF的分布式/准分布式微波光子传感技术外,基于微波光子信号产生技术也可以实现分布式/准分布式传感. 2014年,暨南大学关柏鸥教授团队基于外差拍频机理[76],利用CO2激光器侧面辐射工艺调控DBR激光器的环内双折射,改变DBR激光器的PMBF,结合频分复用技术,实现了16个DBR激光器传感单元的同时解调. 2020年,南京大学陈向飞教授团队提出了基于低频OEO结构的准分布式FBG传感系统[77],实现了1 km范围内多个FBG传感单元的准确定位以及温度和应变传感信息的高精度解调.

此外,基于色散波长-时间映射机理,国内外研究团队提出了一系列高性能的分布式/准分布式微波光子传感系统. 2017年,英国肯特大学王超教授团队提出了基于光域时间拉伸频率反射仪(Optical Time-Stretch Frequency-Domain Reflectometry,OTS-FDR)技术的高性能分布式应变传感系统[78],实现了50 MHz的测量速度、31.5 μm的空间分辨率以及9.1 με的应变分辨率. 2018年,武汉理工大学李政颖教授团队提出了基于色散效应的大规模全同FBG传感网络解调技术[79],实现了105个FBG同时解调,解调速度为40 kHz,FBG反射波长测量精度为8 pm(~0.8 ℃/~8 με). 2019年,加拿大渥太华大学姚建平教授团队提出了基于SS-WTTM和时分复用的准分布式传感系统[80],采用R-FBG作为传感单元,结合数字域脉冲压缩技术,实现了0.23 ℃和2.5 με的温度和应变传感灵敏度. 随后,该研究团队进一步提出基于LCFBG阵列和光域脉冲压缩的准分布式传感系统[81],其工作原理如图13所示. 该系统采用$LCFBG_{ij}$作为传感单元,实现光波长漂移到光脉冲时延变化的线性转换,采用另一个具有相反色散系数的LCFBG(LCFBG*)在光域进行脉冲压缩,从而提高温度/应变传感分辨率. 该系统实现了6个LCFBG传感单元同时解调,测量速度为48.6 MHz,温度和应变分辨率分别为0.045 ℃和0.26 με.

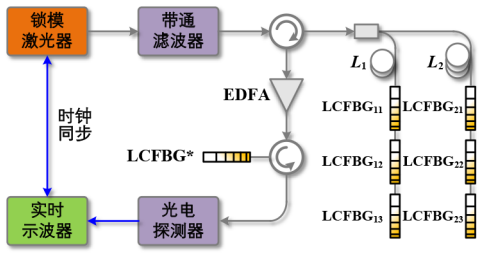


图13　基于LCFBG阵列和光域脉冲压缩的准分布式光学传感系统工作原理示意图[81]

6　集成微波光子传感技术

随着超大规模、超高精细光子集成技术的快速发展,小型化和芯片化成为微波光子传感未来发展的必然趋势. 芯片集成不仅能大幅减小微波光子传感系统体积、降低功耗和成本、提高系统稳定性,同时微纳波导结构可显著增强光与物质的相互作用,从而提升微波光子传感系统的灵敏度.

2017年，以色列希伯来大学Levy等人提出了基于PDH稳频和级联微环谐振腔的超高精度折射率和温度传感系统[82]，其中一个微环谐振腔用作传感单元，另一个微环谐振腔用作参考单元，利用PDH技术，将两个激光器的中心波长分别锁定在两个微环谐振腔的谐振波长处，两个激光器产生的拍频信号由高速光电探测器接收，从而实现光波长漂移到微波频率变换的线性映射和转换. 该方案实现了10^{-8}的折射率传感精度和90 μK的温度传感精度.

随后，澳大利亚悉尼大学Yi等人提出了基于OEO和硅基集成微环谐振腔(Micro-Ring Resonator，MRR)的高精度温度传感系统[83]. 如图14所示，MRR既作为传感单元，同时也是频率选择器件，通过测量OEO输出信号频率变化，可以准确地获得集成MRR的温度信息. 该方案实现了7.7 GHz/°C的温度传感灵敏度和0.02 °C的温度分辨率. 随后，该研究团队通过深入研究集成MRR的幅度和相位响应特性，进一步提出了基于notch型集成微波光子滤波器结构的高精度温度和折射率传感系统[84,85].

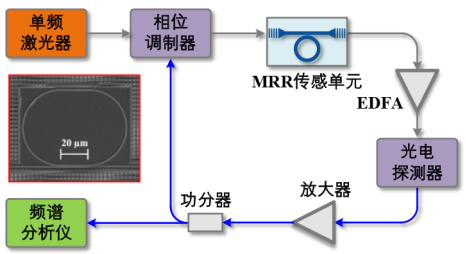


图14 基于OEO和MRR的集成微波光子传感系统原理示意图[83]

2018年，加拿大姚建平教授团队提出了基于带通MPF和硅基集成微盘谐振腔(Micro-Disk Resonator，MDR)的高精度温度/折射率传感系统[86]. 如图15所示，激光器、相位调制器、MDR和光电探测器构成带通MPF结构，通过利用宽度线性调频信号可以准确地测量MPF中心频率变化，从而获得温度、折射率等传感信息. 该方案实现了0.234 °C和1.32×10^{-3} RIU的温度和折射率传感灵敏度，测量速度为100 kHz. 随后，该研究团队通过利用MDR两个高阶谐振模式对温度和折射率的响应度不同[87]，构建二维传感参量矩阵，实现了温度和折射率同时测量，温度和折射率传感灵敏度分别为2.4×10^{-5} °C和9.1×10^{-8} RIU，测量速度为1 MHz.

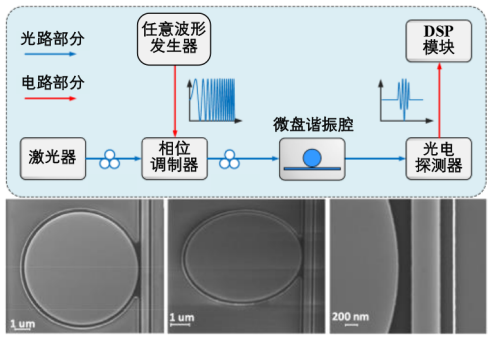


图15 基于带通MPF和MDR的集成微波光子传感系统原理示意图[86]

2021年，北京大学王兴军教授团队提出了基于集成外差干涉仪结构的超高精度光学传感系统[88]，突破了1/*f*噪声极限，实现了单个聚苯乙烯纳米粒子和HIV-1病毒探测，测量精度可达17.5 nm. 同年，美国华盛顿大学Yang等人提出了基于光学回音壁模式条形码的高精度大范围温度传感系统[89]，利用微气泡谐振腔的多模干涉特性构建条形码数据库，实现了65 °C测量范围内0.002 °C的测量精度.

下面对各类微波光子传感技术的优缺点进行总结，如表1所示. 其中，基于微波光子信号产生的传感技术具有较高的传感精度和测量速度，可用于温度、应变等物理量的高精度测量；基于微波光子滤波器的传感技术可实现折射率、横向压力、弯曲、光程差等多元物理参量的高精度传感，但是通常需要矢量网络分析仪来测量微波光子滤波器的响应，因此测量速度受限；基于频谱整形-波长时间映射的传感技术可实现高达数十兆赫兹的测量速度，可用于瞬态物理过程的实时动态监测，但对解调系统带宽要求较高；分布式/准分布式微波光子传感技术可用一套解调系统实现多点/分布式传感，可用于大型建筑结构健康监测等应用，但传感单元器件物理结构和参数需特殊设计；集成微波光子传感技术具有小尺寸、高灵敏度、低成本、高稳定性等显著优势，是微波光子传感技术未来发展的必然趋势，但是仍然存在插入损耗大、批量制备工艺尚不成熟等问题.

表1 微波光子传感技术对比

传感技术	优点	缺点
微波光子信号产生传感技术	高传感精度高，测量速度(~kHz)	传感范围受限，通常为单点传感
微波光子滤波传感技术	高传感精度，可实现多元参量传感	解调系统复杂，测量速度受限
频谱整形-波长时间映射传感技术	超高测量速度(数十兆赫兹)	解调系统带宽要求高，成本较高
分布式/准分布式传感技术	可实现多点/分布式传感	传感单元器件参数需特殊设计
集成微波光子传感技术	小尺寸、高灵敏度、低成本、高稳定性	插入损耗大，批量制备工艺尚不成熟

7　结束语

微波光子传感作为一种新型的光学传感技术,结合光域感知和微波域处理的技术特点,具有传感精度高、测量速度快等显著优势,在边界安防、航天航空、工业制造、智能结构健康监测等领域具有广泛的应用前景. 随着新一代物联网技术的高速发展,对微波光子传感技术也提出了一系列新的要求,主要包括如下几个方面.

(1)单片集成. 目前,现有微波光子传感系统大都由分立光电器件构成,存在体积大、功耗高、成本高等不足,芯片化和集成化是微波光子传感技术未来发展的必然趋势,如何实现传感单元和解调系统单片集成是一个亟待解决的问题.

(2)全分布式传感. 超大规模分布式传感网络是物联网系统的重要组成部分,因此基于微波光子技术构建全分布式光学传感链路具有重要意义.

(3)多参量感知. 目前,现有微波光子传感系统大都只能测量一到两个传感参量,而且不同传感参量之间存在较大串扰,如何实现多参量感知融合是一个亟待解决的问题.

(4)智能化探测. 结合人工智能、机器学习等新型数据处理方法,形成智能化微波光子传感架构,有望实现微波光子传感系统性能指标飞跃.

参考文献

[1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.

[2] TIWARI U, THYAGARAJAN K, SHENOY M R, et al. EDF-based edge-filter interrogation scheme for FBG sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4): 1315-1319.

[3] XU M G, GEIGER H, DAKIN J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 391-396.

[4] HERVÁS J, RICCHIUTI A L, LI W, et al. Microwave photonics for optical sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 327-339.

[5] YAO J P. Microwave photonic sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3626-3637.

[6] KIM H K, KIM S K, PARK H G, et al. Polarimetric fiber laser sensors[J]. Optics Letters, 1993, 18(4): 317-319.

[7] KIM H K, KIM S K, KIM B Y. Polarization control of polarimetric fiber-laser sensors[J]. Optics Letters, 1993, 18 (17): 1465-1467.

[8] HADELER O, IBSEN M, ZERVAS M N. Distributed-feedback fiber laser sensor for simultaneous strain and temperature measurements operating in the radio-frequency domain[J]. Applied Optics, 2001, 40(19): 3169-3175.

[9] SHAO L Y, DONG X Y, ZHANG A P, et al. High-resolution strain and temperature sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1598-1600.

[10] FU H Y, SHU X W, MOU C B, et al. Transversal loading sensor based on tunable beat frequency of a dual-wavelength fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(14): 987-989.

[11] LIU W S, GUO T, WONG A C L, et al. Highly sensitive bending sensor based on Er 3+-doped DBR fiber laser[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 17834-17840.

[12] GUAN B O, JIN L, ZHANG Y, et al. Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1097-1112.

[13] ZHANG Y, GUAN B O, TAM H Y. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement[J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4619-4622.

[14] ZHANG Y, GUAN B O. High-sensitivity distributed Bragg reflector fiber laser displacement sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(5): 280-282.

[15] GUAN B O, WANG S N. Fiber grating laser current sensor based on magnetic force[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(4): 230-232.

[16] GUO T, WONG A C L, LIU W S, et al. Beat-frequency adjustable Er 3+-doped DBR fiber laser for ultrasound detection[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2485-2492.

[17] YIN Z W, GAO L, LIU S C, et al. Fiber ring laser sensor for temperature measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(23): 3403-3408.

[18] LIU S C, YIN Z W, ZHANG L, et al. Multilongitudinal mode fiber laser for strain measurement[J]. Optics Letters, 2010, 35(6): 835-837.

[19] GAO L, LIU S C, YIN Z W, et al. Fiber-optic vibration sensor based on beat frequency and frequency-modulation demodulation techniques[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 18-20.

[20] GUO Y, MAO X W, SONG S L, et al. Multi-longitudinal mode fiber laser digital vibration-sensing system based

on a multi-carrier modulation/demodulation technique[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31808-31820.

[21] HUANG L, WANG P, GAO L, et al. Multiplexed multi-longitudinal mode fiber laser sensor[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25722-25728.

[22] DAI Y, SUN Q Z, TAN S S, et al. Highly sensitive liquid-level sensor based on dual-wavelength double-ring fiber laser assisted by beat frequency interrogation[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27367-27376.

[23] BERNHARDI E H, WERF K O VAN DER, HOLLINK A J F, et al. Intra-laser-cavity microparticle sensing with a dual-wavelength distributed-feedback laser[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 589-598.

[24] DENG M, LIU D H, HUANG W, et al. Highly-sensitive magnetic field sensor based on fiber ring laser[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 645-651.

[25] XU R H, ZHANG X P. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser temperature sensor with tunable and high sensitivity[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-8.

[26] MALEKI L. The optoelectronic oscillator[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 728-730.

[27] YAO X S, MALEKI L. Multiloop optoelectronic oscillator[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(1): 79-84.

[28] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic oscillator for photonic systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(7): 1141-1149.

[29] YAO J P. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3489-3497.

[30] NGUYEN L D, NAKATANI K, JOURNET B. Refractive index measurement by using an optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22 (12): 857-859.

[31] LEE C H, YIM S H. Optoelectronic oscillator for a measurement of acoustic velocity in acousto-optic device[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13634-13640.

[32] ZOU X H, LI M, PAN W, et al. Optical length change measurement via RF frequency shift analysis of incoherent light source based optoelectronic oscillator[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11129-11139.

[33] ZHU Y H, JIN X F, CHI H, et al. High-sensitivity temperature sensor based on an optoelectronic oscillator[J]. Applied Optics, 2014, 53(22): 5084-5087.

[34] JIN X F, ZHU Y H, GUO J J, et al. Highly sensitive demodulation of a vibration-induced phase shift based on a low-noise OEO[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4052-4054.

[35] FAN Z Q, SU J, ZHANG T H, et al. High-precision thermal-insensitive strain sensor based on optoelectronic oscillator[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27037-27050.

[36] ZHANG J, WANG M G, TANG Y, et al. High-sensitivity measurement of angular velocity based on an optoelectronic oscillator with an intra-loop Sagnac interferometer [J]. Optics Letters, 2018, 43(12): 2799-2802.

[37] WANG M G, ZHANG N H, HUANG X D, et al. High sensitivity demodulation of a reflective interferometer-based optical current sensor using an optoelectronic oscillator[J]. Optics Letters, 2020, 45(16): 4519-4522.

[38] LI M, LI W Z, YAO J P, et al. Femtometer-resolution wavelength interrogation of a phase-shifted fiber Bragg grating sensor using an optoelectronic oscillator[C]// Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides. Washington: Optica Publishing Group, 2012: BTu2E.3.

[39] KONG F Q, LI W Z, YAO J P. Transverse load sensing based on a dual-frequency optoelectronic oscillator[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2611-2613.

[40] KONG F Q, ROMEIRA B, ZHANG J J, et al. A dual-wavelength fiber ring laser incorporating an injection-coupled optoelectronic oscillator and its application to transverse load sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(9): 1784-1793.

[41] WANG Y P, ZHANG J J, YAO J P. An optoelectronic oscillator for high sensitivity temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(13): 1458-1461.

[42] YIN B, WANG M G, WU S H, et al. High sensitivity axial strain and temperature sensor based on dual-frequency optoelectronic oscillator using PMFBG Fabry-Perot filter [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14106-14113.

[43] WU B L, WANG M G, DONG Y, et al. Magnetic field sensor based on a dual-frequency optoelectronic oscillator using cascaded magnetostrictive alloy-fiber Bragg grating-Fabry Perot and fiber Bragg grating-Fabry Perot filters[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27628-27638.

[44] YANG Y G, WANG M G, SHEN Y, et al. Refractive index and temperature sensing based on an optoelectronic oscillator incorporating a fabry-perot fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-9.

[45] FENG D Q, KAI L, ZHU T, et al. High-precision strain-

insensitive temperature sensor based on an optoelectronic oscillator[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37532-37540.

[46] FU H Y, ZHANG W, MOU C B, et al. High-frequency fiber Bragg grating sensing interrogation system using Sagnac-loop-based microwave photonic filtering[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(8): 519-521.

[47] HUANG J, LAN X W, SONG Y, et al. Microwave interrogated sapphire fiber Michelson interferometer for high temperature sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(13): 1398-1401.

[48] CAO Y, GUO T, WANG X D, et al. Resolution-improved in situ DNA hybridization detection based on microwave photonic interrogation[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27061-27070.

[49] WANG Y P, WANG M, XIA W, et al. High-resolution fiber Bragg grating based transverse load sensor using microwave photonics filtering technique[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17960-17967.

[50] ZHENG D, MADRIGAL J, BARRERA D, et al. Microwave photonic filtering for interrogating FBG-based multicore fiber curvature sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(20): 1707-1710.

[51] ZHU K, CHENG X, ZHAO Z Y, et al. High-sensitivity, high-resolution polymer fiber Bragg grating humidity sensor harnessing microwave photonic filtering response analysis[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6603-6606.

[52] DENG Y, LI M, HUANG N B, et al. Optical length-change measurement based on an incoherent single-bandpass microwave photonic filter with high resolution[J]. Photonics Research, 2014, 2(4): B35-B39.

[53] WANG Y P, NI X Q, WANG M, et al. Demodulation of an optical fiber MEMS pressure sensor based on single bandpass microwave photonic filter[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 644-653.

[54] COMANICI M I, CHEN L R, KUNG P. Microwave photonic filter-based interrogation system for multiple fiber Bragg grating sensors[J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 9074-9078.

[55] LI L W, YI X K, CHEW S X, et al. Double-pass microwave photonic sensing system based on low-coherence interferometry[J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1662-1665.

[56] XU Z W, SHU X W, FU H Y. Sensitivity enhanced fiber sensor based on a fiber ring microwave photonic filter with the Vernier effect[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21559-21566.

[57] LUO C M, ZHENG D, ZOU X H, et al. Performance upgradation of microwave photonic filtering interrogation using Gaussian process regression[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(24): 7682-7688.

[58] XIAO D R, SHAO L Y, WANG C, et al. Optical sensor network interrogation system based on nonuniform microwave photonic filters[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2564-2576.

[59] YAO J P. Photonic generation of microwave arbitrary waveforms[J]. Optics Communications, 2011, 284(15): 3723-3736.

[60] CHOU J, HAN Y, JALALI B. Time-wavelength spectroscopy for chemical sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1140-1142.

[61] XIA H Y, WANG C, BLAIS S, et al. Ultrafast and precise interrogation of fiber Bragg grating sensor based on wavelength-to-time mapping incorporating higher order dispersion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (3): 254-261.

[62] WANG C, YAO J P. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(19): 2927-2933.

[63] LIU W L, LI M, WANG C, et al. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor based on chirped pulse compression with improved resolution and signal-to-noise ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1239-1247.

[64] LIU W L, LI W Z, YAO J P. Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(18): 1340-1342.

[65] DENG H, LU P, MIHAILOV S J, et al. High-speed and high-resolution interrogation of a strain and temperature random grating sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5587-5592.

[66] LEI M, ZOU W W, LI X, et al. Ultrafast FBG interrogator based on time-stretch method[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 778-781.

[67] FERNÁNDEZ M P, BULUS ROSSINI L A, CRUZ J L, et al. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36815-36823.

[68] BAI Z Y, YAN F P, TANG M, et al. Real-time strain in-

terrogation based on an STS structure and wavelength-to-time mapping[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(12): 615-618.

[69] BAI Z Y, YAN F P, HAN W G, et al. Ultrafast and temperature-insensitive strain interrogation using a PM-PCF based Sagnac loop interferometer and wavelength-to-time mapping[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13778-13786.

[70] HUANG J, HUA L, LAN X W, et al. Microwave assisted reconstruction of optical interferograms for distributed fiber optic sensing[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18152-18159.

[71] HUANG J, LAN X W, LUO M, et al. Spatially continuous distributed fiber optic sensing using optical carrier based microwave interferometry[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18757-18769.

[72] RICCHIUTI A L, BARRERA D, SALES S, et al. Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28175-28181.

[73] XIA L, CHENG R, LI W, et al. Identical FBG-based quasi-distributed sensing by monitoring the microwave responses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27 (3): 323-325.

[74] HERVÁS J, TOSI D, GARCÍA-MIQUEL H, et al. KLT-Based Interrogation technique for FBG multiplexed sensor tracking[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3387-3392.

[75] WU N S, XIA M, WU Y, et al. Microwave photonics interrogation for multiplexing fiber Fabry-Perot sensors[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 16652-16664.

[76] JIN L, LIANG Y Z, LI M P, et al. A 16-element multiplexed heterodyning fiber grating laser sensor array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(22): 4410-4415.

[77] WANG W X, LIU Y, DU X W, et al. Ultra-stable and real-time Demultiplexing system of strong fiber Bragg grating sensors based on low-frequency optoelectronic oscillator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 981-988.

[78] AHMAD E J, WANG C, FENG D J, et al. High temporal and spatial resolution distributed fiber Bragg grating sensors using time-stretch frequency-domain reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3289-3295.

[79] ZHOU L, LI Z Y, XIANG N, et al. High-speed demodulation of weak fiber Bragg gratings based on microwave photonics and chromatic dispersion[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2430-2433.

[80] LIU J X, LU P, MIHAILOV S J, et al. Real-time random grating sensor array for quasi-distributed sensing based on wavelength-to-time mapping and time-division multiplexing[J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 379-382.

[81] WANG B, LU P, MIHAILOV S J, et al. Real-time and high-precision interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor array based on dispersive time delay and optical pulse compression[J]. Optics Letters, 2019, 44 (13): 3246-3249.

[82] STERN L, NAIMAN A, KEINAN G, et al. Ultra-precise optical to radio frequency based chip-scale refractive index and temperature sensor[J]. Optica, 2017, 4(1): 1-7.

[83] CHEW S X, YI X K, YANG W J, et al. Optoelectronic oscillator based sensor using an on-chip sensing probe[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-9.

[84] TIAN X Y, POWELL K, LI L W, et al. High-resolution optical microresonator-based sensor enabled by microwave photonic sidebands processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5440-5449.

[85] TIAN X Y, LI L W, CHEW S X, et al. Cascaded optical microring resonator based auto-correction assisted high resolution microwave photonic sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(24): 7646-7655.

[86] DENG H, ZHANG W F, YAO J P. High-speed and high-resolution interrogation of a silicon photonic microdisk sensor based on microwave photonic filtering[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4243-4249.

[87] LIU J X, DENG H, ZHANG W F, et al. On-chip sensor for simultaneous temperature and refractive index measurements based on a dual-passband microwave photonic filter[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(18): 4099-4105.

[88] JIN M, TANG S J, CHEN J H, et al. 1/f-noise-free optical sensing with an integrated heterodyne interferometer[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1973.

[89] LIAO J, YANG L. Optical whispering-gallery mode barcodes for high-precision and wide-range temperature measurements[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 33.

作者简介

王　彬　男，1992年出生，湖南娄底人. 2020年于上海交通大学电子信息与电气工程学院获得博士学位，北京理工大学预聘助理教授（特别副研究员），硕士生导师. 研究方向为微波光子传感、信号处理、集成微波光子芯片等.

E-mail: bin_wang@bit.edu.cn

张伟锋　男，1985年出生，河南洛阳人. 北京理工大学教授，博士生导师，国家海外高层次青年人才计划入选专家. 研究方向为集成微波光子学和光子计算等.

E-mail: weifeng.zhang@bit.edu.cn

赵双祥　男，1993年出生，江苏连云港人. 2021年于上海交通大学电子信息与电气工程学院获得博士学位，北京理工大学博士后. 研究方向为超高精度光学传感、精密光学陀螺仪等.

E-mail: beichen@sjtu.edu.cn

樊昕昱　男，1978年出生，江苏南通人. 上海交通大学教授，博士生导师，国家海外高层次青年人才计划入选专家. 研究方向为分布式光纤传感、双光梳精密测量等.

E-mail: fan.xinyu@sjtu.edu.cn