

分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展

刘铁根 于哲 江俊峰 刘琨 张学智 丁振扬 王双 胡浩丰 韩群 张红霞 李志宏

Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research

Liu Tie-Gen Yu Zhe Jiang Jun-Feng Liu Kun Zhang Xue-Zhi Ding Zhen-Yang Wang Shuang
Hu Hao-Feng Han Qun Zhang Hong-Xia Li Zhi-Hong

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 070705 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070705

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070705>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型长周期光纤光栅的设计与研制进展

[Recent progress in design and fabrication of novel longperiod fiber grating](#)

物理学报.2017, 66(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070704>

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

[Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals](#)

物理学报.2015, 64(12): 120702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120702>

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

[Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors](#)

物理学报.2015, 64(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

[A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber](#)

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性

[Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings](#)

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702>

专题: 光纤传感

分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展*

刘铁根[†] 于哲 江俊峰 刘琨 张学智 丁振扬 王双 胡浩丰 韩群
张红霞 李志宏

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津市光纤传感工程中心, 天津 300072)

(2016年11月28日收到; 2017年2月21日收到修改稿)

光纤传感技术已广泛应用于航空航天、石油化工、电子电力、土木工程、生物医药等领域, 其技术形式主要体现为分立式和分布式. 分立式光纤传感技术利用光纤敏感器件作为传感器来感知被测参量的变化, 光纤作为光信号的传输通道连接光纤传感器及后端的解调装置; 分布式光纤传感系统基于光纤瑞利散射、拉曼散射或布里渊散射等光学效应, 利用光纤本身作为传感器, 可对沿途的光信号进行大范围、长距离传感. 本文介绍了分立式与分布式光纤传感中主要关键技术研究进展, 并对未来的研究和发展方向进行了探讨.

关键词: 光纤传感, 分立式, 分布式, 传感网

PACS: 07.60.Vg, 07.07.Df, 87.19.lt

DOI: 10.7498/aps.66.070705

1 引言

光纤传感技术起源于20世纪60年代的两项重大科学发现: 1960年激光器的发明^[1]和1966年低损耗光纤理论的建立^[2]. 20世纪70年代, 伴随光纤及光纤通信技术的发展, 光纤传感技术开始起步^[3]. 光纤传感技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、质量轻、体积小、可复用、可组网等优越性, 可以对转动、加速度、电磁场、温度、压力、应力、声音、振动、湿度、黏度、折射率、浓度等多种理化参量进行传感, 因此在航空航天、石油化工、电子电力、土木工程、生物医药等领域有着广泛的应用前景. 该技术自建立以来在国内外引发了研究热潮并延续至今. 我国近年来尤其重视这一技术的发展, 设立了一系列国家级重大、重点研发计划来推动相应的研究, 如天津大学牵头承担的国家重点基础研究计划“新一代光纤智能传感网与关键器件基础研究”和国家重大科学仪器设备开发专项项目“光纤力热复合测试仪开发

和应用”, 武汉理工大学牵头承担的国家自然科学基金重大项目“光纤传感网关键器件与技术研究”等. 这些研究取得了丰硕的成果, 有力推动了我国光纤传感技术的发展, 相应研究成果已经在生产和生活的各个方面获得广泛应用.

光纤传感按照结构可以分为分立式光纤传感技术和分布式光纤传感技术两大类, 本文着重介绍两类光纤传感的主要关键技术研究进展.

2 分立式光纤传感技术

分立式光纤传感技术利用光纤敏感器件作为传感器来感知被测参量的变化, 通过被测参量对光谱、光强、偏振等光学参量的调制获取被测量的信息. 光纤作为光信号的传输通道连接了光纤传感器及后端的解调装置. 下面主要介绍光纤光栅传感技术、光纤Fabry-Perot (F-P) 传感技术、光纤陀螺传感技术、光纤内腔传感技术、光纤表面等离子体传感技术、空心光纤回音壁谐振模传感技术、磁流

* 国家自然科学基金(批准号: 61675152, 61227011, 61378043, 61475114, 61505139, 61505138)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2013YQ030915)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: tgliu@tju.edu.cn

体光纤传感技术和光纤光学相干层析成像技术的研究.

2.1 光纤光栅传感技术

目前在工程中广泛应用的光纤光栅传感器主要基于光纤布拉格光栅 (FBG), 是一种纤芯折射率周期性变化的光纤结构. FBG 的布拉格波长对外界变化非常敏感, 当 FBG 所处环境温度、应变发生变化时, FBG 的布拉格波长会随之发生漂移, 通过对布拉格波长的测量, 即可实现对多种物理参量的传感. 1992 年, Kersey 和 Berkoff^[4] 利用 FBG 设计了微分式光纤温度传感器, 其温度传感精度可达 0.05 °C. 2001 年, Guo 等^[5] 采用错位光纤结构, 并在光纤上制作光栅结构, 可以实现对振动和弯曲的测量. 2008 年, Xu 等^[6] 采用 FBG 进行压力测量, 在 70 MPa 压强下实现了 3.04×10^{-3} nm/MPa 的测量灵敏度.

除了对待测量的拓展之外, 研究人员也提出了多种 FBG 波长解调方法, 如衍射光栅法^[7]、边缘滤波法^[8]、可调谐 F-P 滤波法^[9] 等. 衍射光栅法解调的信噪比高, 但成本高且较难进行实时校正; 边缘滤波解调法具有体积小、质轻、低功耗的优点, 但复用性较差; 而可调谐 F-P 滤波法复用性强, 且易于实现 FBG 波长的动静态监测, 获得高质量的光谱分析, 是当前实用性较好的方法之一.

在极端环境下的应用是当前 FBG 传感技术的一个重要发展方向^[10]. 针对高温检测应用, 利用飞秒激光器在蓝宝石光纤上刻写的光栅, 可以在高温环境下保持稳定的光栅结构和传感特性, 温度检测上限可达 1500 °C^[11]. 天津大学基于航天中的应用需求, 研制了可工作于低温环境的 FBG 传感器, 采用金属基底增敏封装结构来提高传感器在低温下的灵敏度; 并利用无胶封装和预拉伸工艺解决光纤光栅在低温下的蠕变和啁啾等问题. 图 1 所示为 FBG 传感器在 -196 °C 液氮环境中 217 h 连续测量的结果, 可以看出, FBG 传感器的波长波动幅值小于 9 pm, 标准差为 0.76 pm. 这表明研制的 FBG 传感器可以在较长时间的低温环境下保持性能稳定.

航天环境复杂多变, 温度、真空、辐照等因素均会对解调设备产生影响. 天津大学重点对 FBG 解调系统在宽温范围内的温漂特性做了理论和实验分析, 并通过复合波长参考法进行温漂的校正,

实现了不同稳态温度下的绝对波长解调, 解调结果波动幅度为 ± 1.2 pm, 标准差为 0.39 pm^[12]. 而在环境温度较快变化时, 可调谐 F-P 滤波器的波长电压扫描的重复性变差, 导致解调波长波动幅度高达 ± 28.5 pm, 标准差 8.6 pm. 我们通过引入光纤迈克耳孙干涉仪作为辅助的光频率细分模块进行抑制, 在平均变温速率为 2.2 °C/min 时, 解调结果波动幅度降低至 ± 3.5 pm, 标准差 1.4 pm, 解调的稳定性提高了 6.5 倍^[13].

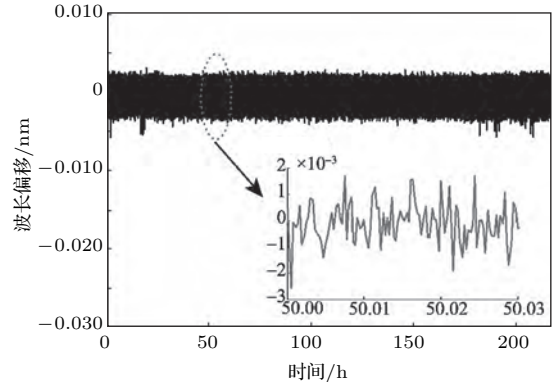


图 1 液氮环境中光纤光栅传感器的波长变化^[11]
Fig. 1. The wavelength change of fiber bragg grating sensor in liquid nitrogen^[11].

2.2 光纤 F-P 传感技术

光纤 F-P 传感技术通过待测量作用于 F-P 腔产生的腔长变化进行传感. F-P 腔为光纤 F-P 压力传感器的核心敏感元件, 入射光在 F-P 腔的两个端面形成反射, 产生干涉信号, 干涉信号随着 F-P 腔长的改变而发生变化, 通过对干涉信号进行解调实现对待测参量传感. 按照不同的 F-P 腔构成方式, 可以将光纤 F-P 待测参量传感器分为本征型和非本征型两大类, 图 2 为这两类传感器的典型结构.

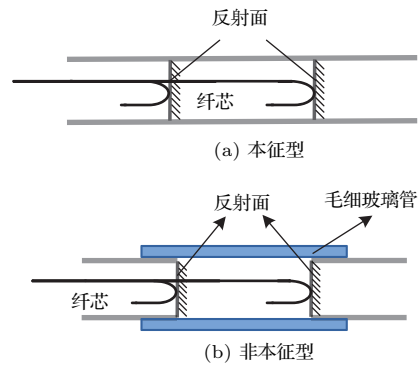


图 2 典型光纤 F-P 传感器结构图 (a) 本征型; (b) 非本征型
Fig. 2. Typical structural diagram of optic fiber Fabry-Perot sensor: (a) Intrinsic; (b) extrinsic.

本征型光纤 F-P 传感器是最早进行研究的一种光纤 F-P 传感器, 由 Lee 和 Taylor^[14] 于 1988 年首次制作成功, 其 F-P 腔由光纤本身构成, F-P 腔的两个反射端面外侧可以是空气介质也可以是光纤介质. 除通过在光纤两端镀反射膜的方式制作 F-P 腔外, 通过在光纤中间熔接不同反射率光纤的方式也可以构成本征型光纤 F-P 传感器. 例如, 将蓝宝石光纤与单模光纤熔接在一起^[15], 或在两段单模光纤中间熔接一段多模光纤^[16]. 本征型光纤 F-P 传感器通过侧向感受待测参量, 但由于温度、应变等参量同样会影响 F-P 腔光纤介质的折射率, 本征型光纤 F-P 传感器容易产生多参量交叉敏感问题.

非本征型光纤 F-P 传感器的 F-P 腔不再是光纤本身, 而是空气或其他介质, 具有测量灵敏度高、动态范围大、温度不敏感的优点, 成为光纤 F-P 压力传感器的研究重点^[17]. 1991 年, Murphy 等^[18] 通过使用环氧树脂将导入光纤、反射光纤分别与准直毛细管固定在一起的方式研制成功非本征型光纤 F-P 传感器, 目前成为光纤 F-P 传感器中应用最为广泛的结构. 采用膜片结构的非本征型光纤 F-P 传感器可直接将压力转化为 F-P 腔长度, 因此给传感器的设计带来很多便利, 所以在压力传感方面, 基于光纤 F-P 的光纤压力传感器具有灵敏度和尺寸优势, 是光纤 F-P 传感器最重要的研究方向. 国内外研究人员对制作 F-P 腔结构提出了多种方案, 主要包括光纤端面直接刻蚀微腔、毛细管封装微腔、基片蚀刻微腔. 发展趋势是集成化、微型化的光纤 F-P 压力传感器. 例如: 2014 年, Liao 等^[19] 通过改进的放电技术制作出厚度仅为 320 nm 的光纤端微泡结构, 其构成的 F-P 腔在 1550 nm 波长下, 压力灵敏度为 1036 pm/MPa; 2015 年, Sun 等^[20] 在光纤端面形成聚合物端帽构成 F-P 腔的方法制作了对温度、压力同时具有较高灵敏度的光纤 F-P 传感器. 天津大学已研制成高精度压力传感器并实现了批量化制作, 在此基础上研究了基于压差的光纤 F-P 温度传感器^[21] 和基于混合 F-P 腔结构的压力和温度双参量传感器^[22], 实现了高精度压力和温度同时测量.

除传感器外, 研究人员在 F-P 腔腔长提取方面也进行了大量研究, 提出多种解调方法, 主要分为强度解调方法、光谱解调方法以及低相干干涉解调方法三大类. 光纤 F-P 压力强度解调方法对应的系

统结构简单, 响应速度快, 是早期用于光纤 F-P 压力传感解调的一种方法^[23,24], 但存在测量范围受限、传感器制作过程中腔长控制精度以及光源稳定性要求过高的问题. 光谱解调方法通过获取受光纤 F-P 压力传感器调制的光信号的光谱信息, 对 F-P 腔长进行解调, 与强度解调方法相比, 其探测装置不再是获取强度的光电探测器, 而是更为复杂的光谱获取系统, 如光谱仪或基于可调谐 F-P 滤波技术的光谱获取系统. 国内外研究人员针对干涉光谱信息的解调方法进行了大量研究, 包括条纹计数法^[25,26] 和傅里叶变换光谱法^[27,28] 等, 目前光纤 F-P 压力传感解调普遍选择光谱解调方法, 但该方法会受到光源光谱分布不平坦的影响, 且光谱仪造价普遍较高. 1983 年, Al-Chalabi 等^[29] 提出了光纤低相干干涉解调方法, 由于低相干干涉技术能够有效测量绝对距离, 因此非常适合光纤 F-P 压力传感器腔长的解调, 一系列基于光纤低相干干涉技术的压力传感解调系统被先后提出, 主要分为时间扫描型和空间扫描型两类, 如图 4 所示, 其最终目的是在时间轴或空间轴上产生一系列的光程差.

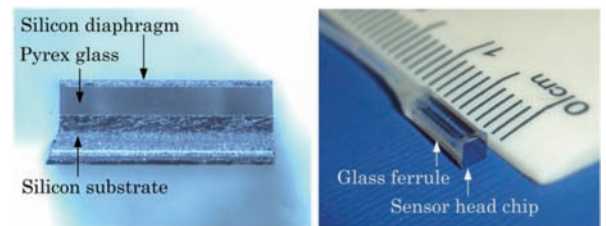


图 3 基于混合 F-P 腔结构的压力和温度双参量传感器^[22]

Fig. 3. Pressure and temperature dual-parameter sensor based on mixed Fabry-Perot cavity^[22].

天津大学研制成基于偏振低相干干涉技术的压力解调系统, 并对系统性能从多个角度进行全面分析^[30-32], 分别侧重高精度、快速处理、系统色散特性补偿等方面对低相干干涉解调算法进行大量研究, 提出了多种新型低相干干涉解调算法. 其中, 单色频率绝对相位法^[33] 利用频谱相位信息恢复单个频率的绝对相位, 通过恢复的绝对相位值实现对低相干干涉信号的高精度解调; 任意极值法^[34] 通过设定阈值的方式对干涉图样中多个条纹峰值或谷值进行编号并追踪, 利用任意条纹峰值位置对低相干干涉信号进行解调; 色散补偿法^[35] 利用系统色散特性, 补偿传统包络峰值法产生的 F-P 腔长解调误差, 利用补偿后的 F-P 腔长值实现高精度解调; 基于位置相关色散的零级条纹追踪法^[36] 利用

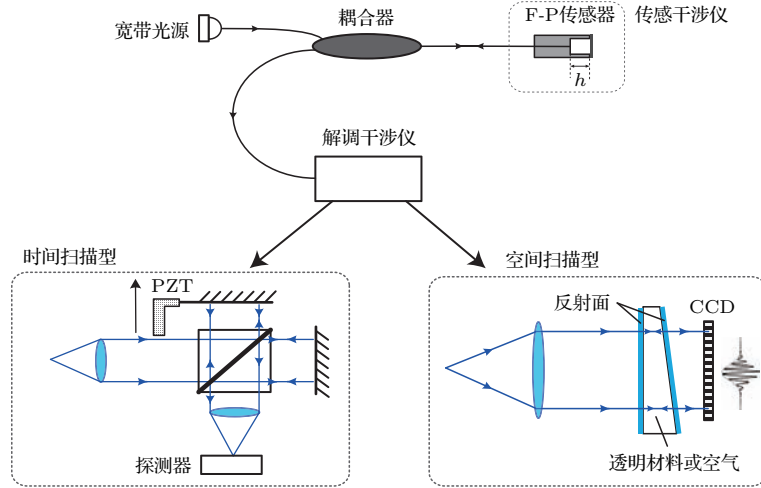


图4 低相干干涉解调方法对应的系统结构图

Fig. 4. System structure for low-coherence interferometry demodulation method

系统色散特性和相移技术恢复中心波长干涉条纹的零级条纹峰值位置, 实现对低相干干涉信号的快速解调. 在实际应用领域中, 针对航空阵列型大气压力传感的需求, 实现了波分复用和频分复用两种传感器的多路复用 [37].

2.3 光纤陀螺传感技术

光纤陀螺 (fiber optic gyro, FOG) 是一种建立在 Sagnac 效应基础上的环形双光束干涉仪, 利用同一光源分出特征相同的两束光波, 在同一光纤线圈中沿顺时针方向和逆时针方向分别传输, 并最终汇合至一点而发生干涉; 若干涉仪闭合光路相对于惯性空间存在一光路法向方向的旋转速率信号, 则沿顺时针方向及逆时针方向传播的光波会产生一个正比于旋转速率的光程差 [38,39].

自从美国犹他大学 (The University of Utah) 科学家 Vali 和 Shorthill [40] 在 1976 年首次成功地完成光纤陀螺的演示实验, 标志着光纤陀螺的诞生. 之后, 光纤陀螺经历了 35 年的发展历程, 达到了较高的水平, 其主要性能指标已达到或接近高性能惯导系统的要求. 目前, 从光纤陀螺未来的发展前景来看, 其精度覆盖面广, 不仅可以用于舰艇、导弹、飞机、卫星等高性能的导航、制导与控制系统 [41-46], 而且通过采用集成电路及集成光路技术, 进一步减小体积、质量及成本, 提高可靠性、稳定性和耐用性后, 将在更多领域得到应用. 目前, 光纤陀螺主要用于捷联式惯导系统, 将来还可能用于平台式惯性系统 [47]. 高精度、低成本和小型化是光纤

陀螺今后发展的主要方向.

从图 5 和图 6 中国外陀螺仪表在近期的发展状况和远期的发展趋势来看 [48,49], 图 5 中光纤陀螺能够适用于 $100^\circ/\sqrt{h}$ 到 $0.001^\circ/\sqrt{h}$ 的精度范围. 但是随着更低成本的微机电/集成光学陀螺精度的提高, 光纤陀螺在 2020 年以后则可能更多地用于导航级以上的高精度领域, 中低精度应用将主要是微机电/集成光学陀螺的市场, 更高精度的应用则为静电陀螺等转子式陀螺和很有潜力的原子干涉陀螺. 高精度光纤陀螺将主要应用于军事装备、空间技术和科学研究等领域. 如卫星应用对陀螺的寿命要求较高, 长达 10—15 年, 适合光纤陀螺的应用场合. 低成本小型化光纤陀螺作为角速率传感器, 将在战术武器、汽车导航、机器人等许多精度要求不高的领域中有更广阔的应用前景. 国外光纤陀螺的随机游走系数已达到 $0.00008^\circ/\sqrt{h}$, 零偏稳定性已优于 $0.0003^\circ/\sqrt{h}$ (1σ), 而实验室下的零偏稳定

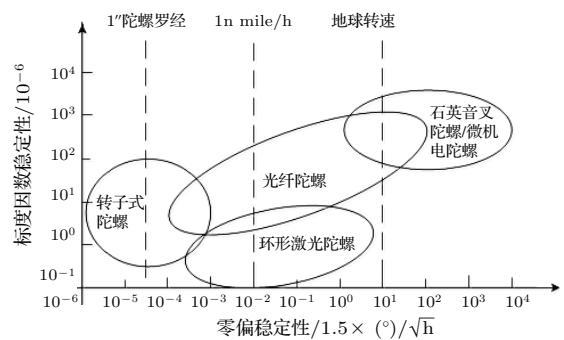


图5 2005 年国外陀螺技术发展状况示意图 [48]

Fig. 5. Status of development for foreign gyroscope technology in 2005 [48].

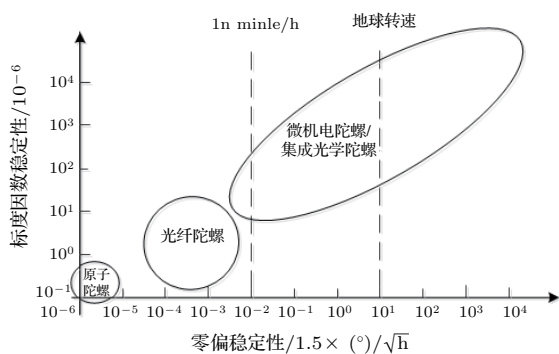


图6 2020年国外陀螺技术发展趋势示意图^[49]
 Fig. 6. Development tendency for foreign gyroscope technology in 2020^[49].

性精度已达到 $0.0002^\circ/\sqrt{h}$ ^[50], 目前正朝着优于 $0.0001^\circ/\sqrt{h}$ 努力, 以满足潜艇等应用对高性能陀螺的要求. 进一步提高光纤陀螺的精度, 需要改进仪表热设计和光纤线圈的绕制技术水平, 提高陀螺温度和力学条件下的零偏性能; 改善光源的平均波长稳定性以提高标度因素重复性; 改进Y波导线性度、改进调制解调方法, 提高标度因数线性度.

光纤环作为光纤陀螺核心敏感元件, 其质量非常关键. 光纤环的量化分析和测量技术是光纤陀螺研究的重点之一. 针对传统二维光纤环温度瞬态响应数学模型的先天不足, 天津大学建立了三维光纤环温度瞬态响应数学模型^[51], 从而能够分析传统方法无法分析的复杂的光纤环敏感轴轴向不对称温度梯度造成的热致非互易性, 此外将光学相干层析成像技术应用用于光纤环结构的直观观测^[52], 突破了原有观测手段无法了解光纤环内部结构的不足, 不仅能实现对光纤环绕制层表面光纤排布的检测, 同时可实现对底层光纤进行无损的检测, 为直接分析光纤环内部结构提供了技术支持.

2.4 光纤内腔传感技术

1971年, Peterson等^[53]在染料激光器的谐振腔内放入一弱窄带吸收体, 发现在吸收体的吸收波长处输出激光的强度减弱. 以此为基础, 在激光理论上逐渐发展起来一种特殊的吸收光谱法——有源内腔法. 有源内腔法将气室放入激光器的谐振腔内, 并使激光器的激光波长与待测气体的吸收光谱相对应, 通过测量激光器输出光谱因气体吸收而引起的变化, 得到待测气体的浓度. 微弱光信号在谐振腔内往返振荡形成激光的过程中, 多次经过待测

气体, 将较小的气室长度等效成为很大的有效吸收光程, 从而极大地提高了气体传感灵敏度. 有源内腔法所用的激光器可以是半导体激光器、固体激光器、染料激光器、光纤激光器等.

基于光纤激光器的有源内腔气体检测系统常采用掺稀土元素的光纤作为增益介质, 具有很宽的增益带宽, 这一带宽范围包含了多种气体的吸收谱线. 利用不同的谱线位置可以判定气体种类, 利用吸收谱线的幅值可以测得气体浓度.

1999年, Hernandez-Cordero和Morse^[54]提出了首个光纤激光内腔气体传感系统, 其利用光纤偏振分束器将有源内腔分为 x 偏振态激光腔和 y 偏振态激光腔两个独立的激光谐振腔, 其中一个谐振腔内含有待测乙炔气体而另一个没有, 而两个谐振腔的噪声相同, 所以应用这种方法可以提高系统的检测灵敏度. 2001年, Stewart等^[55]设计了一套既能够进行衰荡腔吸收物质衰减实验又能进行有源内腔吸收物质衰减实验的实验系统, 并对衰荡腔和内腔吸收气体传感的特性进行了深入研究. 2003年, Zhang等^[56]提出的光纤有源内腔气体传感系统如图7所示. 气室由带尾纤的梯度折射率透镜对准而成, 每个气室对应一个环形内腔, 利用光纤光栅作为波长选择反射镜, 通过给光纤光栅施加应力使其布拉格波长调至与气体吸收谱线一致, 从而使该系统具有多点气体检测能力. 2008年, 天津大学^[57]在光纤环腔气体传感系统中利用可调谐光滤波器实现了波长扫描, 将波长扫描技术和灵敏度增强方法结合起来, 有效提高了乙炔气体的检测准确性和灵敏度.

近年来, 内腔吸收逐渐从单点单气体检测向多点多气体检测发展, 以拓展其应用范围. 2014年, Zhang等^[58]以空芯光子晶体光纤为气室, 采用密集波分复用滤波器将三个气室集成在同一内腔气体检测系统中, 相较于光纤光栅选频, 密集波分复用器更容易使系统获得稳定的激光输出, 并通过对乙炔气体的浓度检测证明了采用复用技术构建内腔气体传感网的可行性. 2015年, Fomin等^[59]利用内腔吸收光谱技术实现了高温环境下 CO , CO_2 及温度多参量的检测, 其采用宽带的掺铒光纤激光器为光源, 波长调谐范围为 $6390\text{--}6410\text{ cm}^{-1}$, 温度范围 $296\text{--}1200\text{ K}$, 气体谱线测量结果与HITRAN分子光谱数据库中给出的结果符合较好. 2016年,

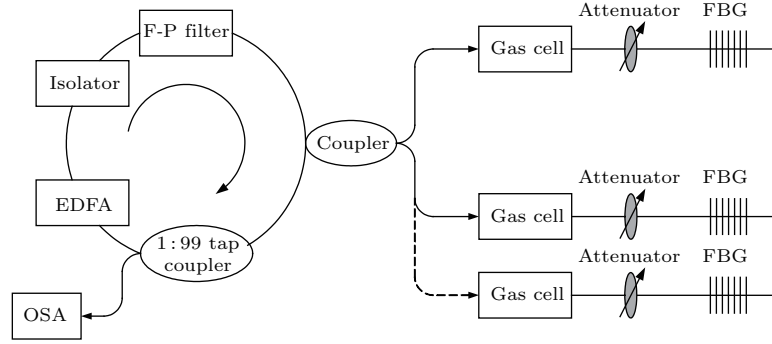


图7 光纤有源内腔气体传感原理 [56]

Fig. 7. Schematic diagram of fiber active intracavity gas detection [56].

天津大学 [60] 针对内腔混合气体检测中的吸收谱线重叠问题, 提出了一种快速谱线分离方法, 该方法将连续小波变换、线性回归分析与混沌粒子群优化结合在一起, 可以从重叠气体吸收光谱中分离出各组分的吸光度分布, 有效提高了 CO 和 CO₂ 混合气体的浓度检测精度.

2.5 光纤表面等离子体传感技术

在金属-电介质界面支持的沿界面的电荷密度振荡称为表面等离子体振荡. 光纤表面等离子体传感器利用光传输过程中在纤芯和包层界面产生的倏逝波来激发表面等离子体振荡, 最早由华盛顿大学的 Jorgenson 教授于 1993 年提出 [61]. 基于这种传感器, 折射率测量的最高分辨率在 900 nm 波长处可达到 7.5×10^{-4} . 此后, 相继报导了用于化学和生物传感领域的各种结构的光纤表面等离子体传感器.

由于表面等离子体谐振是由倏逝波激发金属-电介质界面产生的, 因此凡能够产生倏逝波的器件, 理论上就能够制作特定的表面等离子体传感器. 光纤作为光传输的载体, 光传输过程中在纤芯和包层界面会产生倏逝波, 因而可以用来制作表面等离子体传感器. 光纤耦合结构的表面等离子体传感器采用光纤作为光的传输媒质. 由于光纤的特殊性这种传感器具有其他结构所没有的特点: 它可以很方便地探测一些人类难以进入或者有害的地方, 可以通过光纤对敏感信号的传输实现远程监测和分布式监测, 而且也可以达到较高的灵敏度. 光纤耦合传感器一般是将普通光纤部分的保护层剥离, 将纤芯裸露出来, 再在纤芯外包裹金属膜层及敏感层检测时将该部分与样液接触, 从而实现方便灵敏

的检测.

天津大学利用大直径光纤施加金镀层构成图 8 所示的表面等离子体光纤传感器对温度进行传感, 并首次利用经验模态分解算法处理所得表面等离子体特征谱以提升精度, 最终在 20 °C 实现了 335.7 pm/°C 的温度传感灵敏度和 0.06 °C 的温度分辨率, 在 99 °C 实现了 626.9 pm/°C 的温度传感灵敏度和 0.03 °C 的温度分辨率 [62].

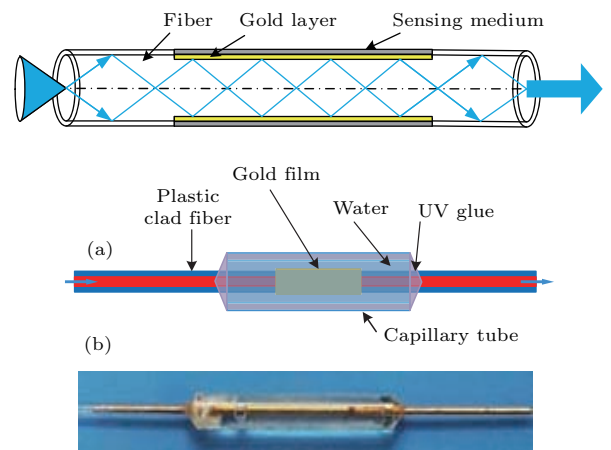


图8 光纤表面等离子体传感器 [62]

Fig. 8. Fiber surface plasma sensor [62].

2.6 空心光纤回音壁谐振模传感技术

空心光纤回音壁谐振模传感技术是利用光纤产生的倏逝场激发的一种沿着介质弯曲边界通过全反射进行传输的能量分布模式, 即回音壁谐振模式 (whispering gallery mode). 相比于直波导空心光纤形成的环状谐振腔中传输的光可以绕环路多次, 因此具有更长的与物质作用的有效长度. 回音壁谐振模式在环状谐振腔的表面上形成倏逝场, 谐振腔表面附近的物质浓度变化或者吸附的生物分

子量的变化都可以由回音壁谐振峰中心波长值来反映, 通过检测谐振峰中心波长, 可以获得谐振腔表面附近分子的定量或动力学信息. 在近些年发展中, 形成了微管型、微瓶型、微泡型及光子晶体型等多种构型, 应用在物理量传感(折射率、温度、磁场强度等)、光纤激光、医学诊断、药品研制、食物监测、环境监测等领域中.

微管型回音壁谐振模传感在2006年由密歇根大学的Fan等^[63]提出, 如图9所示, 其利用一根熔融石英毛细管作为流体样品通道, 通过拉锥光纤产生的倏逝场在石英毛细管上激发回音壁谐振模, 从而实现对石英毛细管内的乙醇-水溶液的浓度进行传感, 其折射率传感灵敏度达到2.6 nm/RIU、 Q 值达到 4.1×10^5 , 折射率传感探测极限达到 1.8×10^5 , 随后又制作出了传感灵敏度达16.1 nm/RIU^[64]、探测极限达 5×10^{-6} RIU的折射率传感器. Gouveia等^[65]研究了微管型传感器的压力特性, 发现在直径为1.8 mm、壁厚为80 μm 的PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)上, 其对于压力的光谱灵敏度可达 (0.36 ± 0.01) nm/bar. 将微管的传感区域直径通过一定的技术手段扩大, 使其形成瓶状结构, 可制作出微瓶型回音壁谐振模传感器. 由于其相对于微管型具有更小的模式体积, 因此具有更高的 Q 值, 该传感器在2009年由Pöllinger等^[66]首次制作出来, 其 Q 值高达 3.6×10^8 . 将微瓶型回音壁谐振模传感器的传感区域直径进一步扩大, 其瓶状结构可变为泡状结构, 这种传感器被称为微泡型回音壁谐振模传感器. 此种类型最早在2010年由OFS实验室的Sumetsky报道^[67], 其制作出的微泡传感器直径为370 μm , 壁厚为2 μm , Q 值达 10^6 .

天津大学通过理论分析指出, 可以在微管内

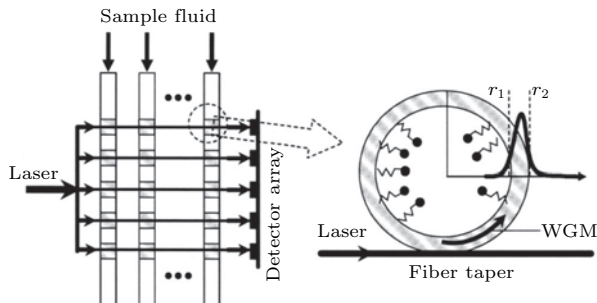


图9 (a) 微管型回音壁谐振模传感示意图; (b) 光耦合入微管后形成回音壁谐振^[63]

Fig. 9. (a) Schematic diagram of microtube whispering gallery mode sensor; (b) the formation of whispering gallery mode under microtube optical coupling^[63].

壁涂覆高折射率介质层吸引电磁场向微管内部移动来提高折射率传感灵敏度, 并计算了折射率传感灵敏度随涂覆层厚度及涂覆层折射率的变化情况, 解释了模式灵敏度的增强原因^[68]. 同时研究了微管回音壁谐振模不同径向模式下的光场分布对传感灵敏度的影响. 通过改变入射光角度, 利用棱镜耦合的方法在微管中激发出不同的径向模式, 实验测得了不同径向模式的传感灵敏度^[69]. 除了微管型传感器外, 还对微泡型传感器进行了研究. 图10为制作出的微泡型回音壁谐振模传感器^[70], 其在1550 nm附近 Q 值达到 1.5×10^7 , 折射率传感灵敏度达到82 nm/RIU. 提出了波导光栅结构与微泡耦合进行波长选择, 从而实现了多波长复用的光微流体传感方法^[71].

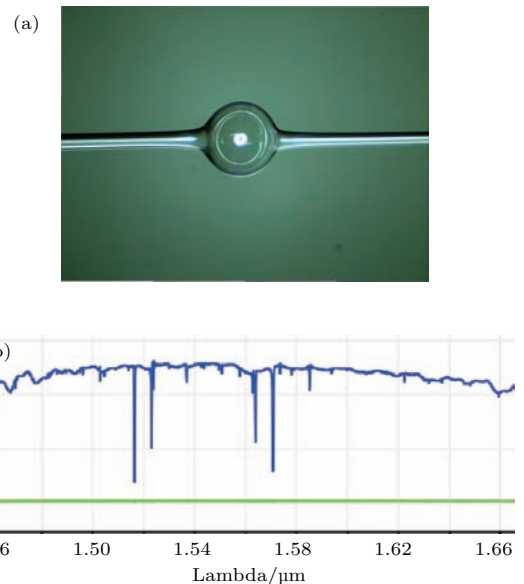


图10 (a) 微泡型回音壁谐振模传感器示意图; (b) 回音壁谐振模特征谱^[71]

Fig. 10. (a) Schematic diagram of micro bubble whispering gallery mode sensor; (b) characteristic spectrum of whispering gallery mode^[71].

2.7 磁流体光纤传感技术

磁流体是一种在适当基液中(如水、煤油等)均匀分散有经化学修饰的纳米级磁性颗粒(如 Fe_3O_4 颗粒)的磁性液体. 在无外界磁场作用时, 因磁性颗粒的表面带有同种极性的电荷, 颗粒之间的相互排斥保证了其能够均匀分散在基液中而不发生团聚或沉淀. 当有足够强的磁场作用时, 磁性颗粒在磁力的作用下发生定向的聚集或排列, 进而从宏观上改变磁流体的光学性质(包括折射率、光吸收系

数等), 或者产生新的效应(如法拉第效应、双折射效应等).

磁流体具有多种优异的磁光效应, 且与通常的固体材料不同, 磁流体的这些光学特性可以通过基液选择或改变磁纳米颗粒浓度在很大的范围内灵活设计, 再加上光纤结构的体积小、易于与磁流体集成等特点, 使得磁流体在光纤磁场传感器^[72,73]得到了极大的关注和研究.

将一段无芯光纤与两段普通单模光纤(SMF)熔接到一起便构成了一个单模-无芯-单模结构(SNS). 当无芯光纤的直径大于单模光纤纤芯的直径时, 在其内部会激发出多个纤芯模式, 此时的SNS结构可以理解为一个多模干涉仪, 且多模干涉情况易受外界扰动的影响, 相应地输出谱线也会随之变化, 通过检测输出谱线的变化情况可实现对外界的参量传感. 图 11 所示为天津大学将 SNS 结构与磁流体相结合所构成的磁场、电流光纤传感器^[74-76]. 在磁场传感方面, 在 0—220 Oe 范围内实现了 905 pm/mT 的磁场传感灵敏度, 同时光强随磁场变化量为 0.748 dB/mT. 在电流传感方面, 在 2.5—6.5 A 的电流强度内实现了 2.12 dB/A 的电流传感灵敏度, 并达到了 200 mA 的探测极限.

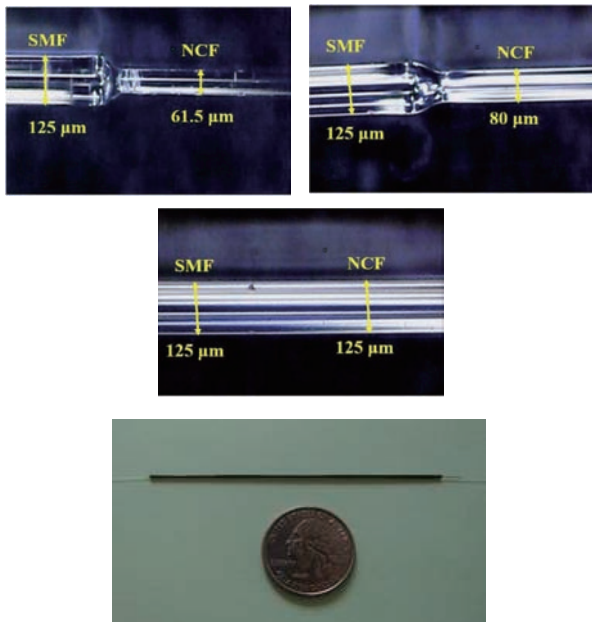


图 11 光纤磁流体传感器^[75, 76]
Fig. 11. Fiber magnetic fluid sensor^[75, 76].

2.8 光纤光学相干层析技术成像技术

光学相干层析技术成像技术(optical coherence tomography, OCT)是将光学相干技术与激光

扫描共焦技术相结合的一种医学层析成像方法, 能够实现对组织内显微结构的高分辨率成像, 在医学上被称为“光学活检”. 利用入射光在生物组织的不同深度反射层产生的背向散射信号, 通过相干测量, 能够完成对样品组织的层析成像, 并已达到微米量级的空间分辨力, 具有广阔的临床应用前景.

光学相干层析技术成像技术最早来源于光学相干域反射测量技术, 一开始是用于网络故障检测或光学器件内部损伤检测^[77,78]. 随后不久人们就发现了它的生物组织探测能力. 1988年, Fercher等^[79]基于迈克耳孙干涉仪用低相干光测得了眼球的长度, 获得眼球的干涉条纹. 1991年, 来自美国麻省理工大学Fujimoto的研究小组^[80]提出OCT概念, 首次成功地实现离体冠状动脉壁以及人眼视网膜显微结构成像. 1993年, Fercher等^[81]和Swanson等^[82]分别将OCT技术用于活体人眼视网膜成像. 随后, 1994年, Izzat等^[83]实现了活体眼前段成像; 1996年OCT技术商业化, 成为眼科临床检测中常用的成像技术; 之后其应用延伸到了高散射组织中, 如皮肤、牙齿^[84,85]等. 通过利用灵活的成像导管, OCT技术也朝消化道内窥成像^[86,87]以及血管内成像方向发展^[88].

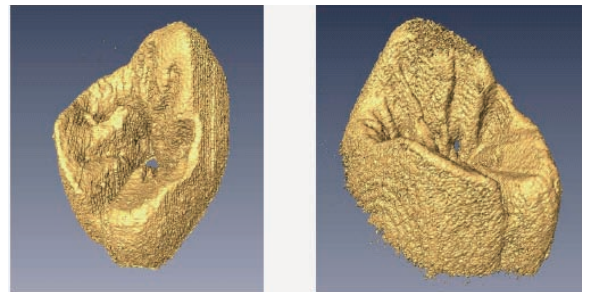


图 12 离体牙齿三维重建 OCT 图像^[92]
Fig. 12. Three-dimensional reconstruction OCT image of extracted teeth^[92].

采用微型化的光纤导管探头, OCT系统可应用于腔内组织成像. 天津大学基于导管控制系统开发出用于血管内成像的OCT系统^[89], 实现对血管内显微结构的精确检测. 通过OCT技术对皮肤组织光学特性进行研究并用于无创血糖检测中, 检测了皮肤组织中多个血糖敏感区域的散射系数与血糖浓度值之间的相关性, 并提出采用偏最小二乘法的多变量无创血糖检测模型^[90]. 建立了口腔诊断用全光纤偏振不敏感OCT系统, 利用基于规则体数据的三维表面模型的构建算法对人离体牙齿进

进行了三维建模, 获得了人离体牙齿的三维 OCT 图像, 如图 12 所示. 开展了龋齿诊断应用实验研究, 进行了人工龋体外建模实验, 为进一步的牙齿修复体质量评估研究打下基础^[91,92].

3 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术基于光纤中光的干涉、瑞利散射、拉曼散射或布里渊散射等光学效应, 利用光纤本身作为传感器, 当光在光纤传输过程中受到加载在路径上的振动、应变、声音、温度变化、结构损伤等载荷的调制时, 其在路径沿线不同空间分布和随时间变化的光信号也会产生相应变化. 分布式光纤传感技术可实现大范围、长距离的全天候传感, 主要包含干涉型扰动分布传感、光频域反射仪 (OFDR) 传感技术、相干光时域反射仪 (Φ -OTDR) 传感技术、光纤布里渊传感技术、光纤拉曼传感技术等.

3.1 干涉型扰动分布传感

干涉型扰动分布传感技术利用光纤作为传感元件, 传感光纤上的任一点都具有传感能力, 能够满足对数十公里内的扰动行为进行预警、定位. 当

扰动行为作用于传感光纤时必然引起光纤长度、折射率的变化, 进而会引起光波相位的变化. 干涉信号随着相位变化而发生改变, 干涉型扰动分布传感技术通过对干涉信号进行解调实现对扰动行为的判断及定位功能. 在干涉型扰动分布式光纤传感系统中, 定位技术的实现主要分为需解调出干涉信号绝对相位和无需解调出干涉信号绝对相位两种^[93].

解调出干涉信号绝对相位的方法发展相对较早, 英国科学家 Russell 和 Dackin^[94] 于 1999 年提出了基于双波长 Sagnac 干涉原理的定位技术, 该系统使用两个波长的光源, 利用波分复用器件使两种波长的光分别通过两条光路, 构成两个独立的 Sagnac 干涉仪. 但是为了保证系统定位的准确性, 必须对部分光纤做屏蔽处理, 且由于该系统传感光纤应用普通单模光纤, 存在干涉型分布式传感系统共有的偏振态退化问题. 2014 年, Yuan 等^[95] 对此系统进行了改进, 如图 13, 用一条光纤代替光纤环, 并在光纤尾端设置法拉第旋转镜, 构成偏振无关 Sagnac 干涉仪, 结构本身具有了抗偏振衰落能力. 且该系统设置成单光纤结构, 巧妙地避免了光纤屏蔽的问题. 目前该系统能够在 70 km 的传感范围内得到 ± 25 m 的定位精度.

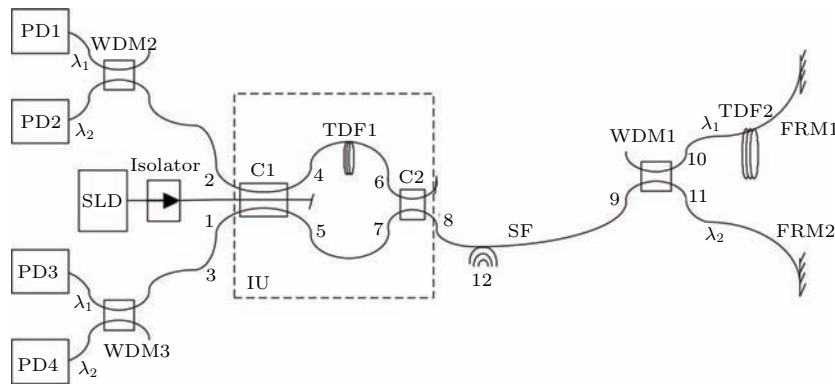


图 13 双波长 Sagnac 光纤扰动传感系统 SLD, 白光光源; C1, 3×3 耦合器; C2, 3 dB 耦合器; WDM1, WDM2, WDM3, 波分复用器; FRM1, FRM2, 法拉第旋转镜; PD1, PD2, PD3, PD4, 光电探测器^[95]

Fig. 13. Dual-wavelength Sagnac optical fiber disturbance sensing system. SLD, white-light source; C1, 3×3 coupler; C2, 3 dB coupler; WDM1, WDM2, WDM3, wavelength division multiplexer; FRM1, FRM2, faraday rotation mirror; PD1, PD2, PD3, PD4, photoelectric detector^[95].

无需解调出干涉信号绝对相位方法利用干涉信号相位之间的延迟特点及干涉信号之间的相关性进行定位. 2002 年, Kizlik^[96] 首次提出了基于双 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉的分布式扰动定位技术, 如图 14, 在该技术中同一个光纤链路里有沿

顺、逆时针两个方向传播的光信号, 当有扰动行为发生时, 位于光纤链路两端的探测器接收到的干涉信号将有一个时延差, 根据时延差可以对扰动点进行定位. 2009 年, Liang 等^[97] 对系统结构进行了改进, 由环形结构变成了直线型, 更适用于实际应用.

2010年, Xie等^[98]对系统定位误差进行分析指出对于宽带信号互相关算法求时延具有更高的定位精度, 但是该系统仍存在干涉型传感系统普遍存在的“偏振相移”和“偏振诱导信号衰落”问题。

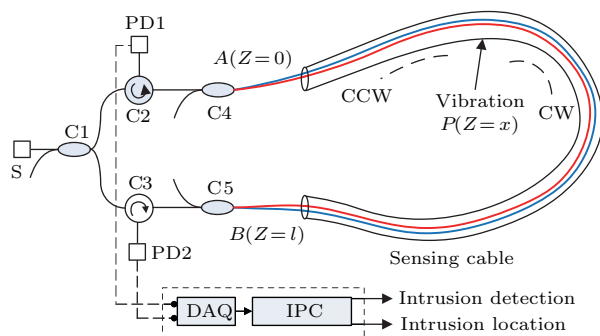


图 14 双马赫-曾德尔光纤扰动传感系统 DAQ, 数据采集卡; IPC, 工控机; C2, C3, 光纤环形器; C1, C4, C5, 3 dB 耦合器; PD1, PD2, 光电探测器^[96]

Fig. 14. Double Mach-Zehnder optical fiber disturbance sensing system. DAQ, data acquisition card; IPC, industrial personal computer; C2, C3, optical fiber circulator; C1, C4, C5, 3 dB coupler; PD1, PD2, photoelectric detector^[96].

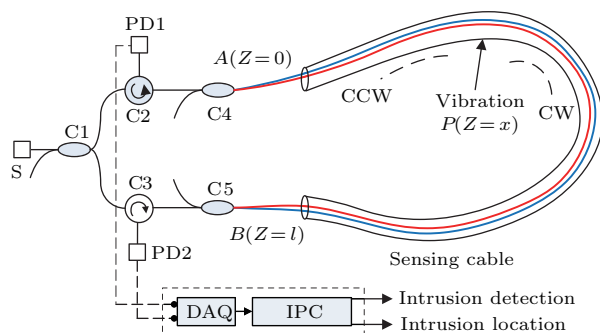


图 15 非对称双马赫-曾德尔增德原理的光纤扰动传感系统 DAQ, 数据采集卡; IPC, 工控机; C2, C3, 3 dB 耦合器; C1, C4, 光纤环形器; PC1, PC2, 偏振控制器; DWDM1, DWDM2, 密集波分复用器; PD1, PD2, 光电探测器; C-PW, CC-PW, 顺时针和逆时针传播的光波^[102]

Fig. 15. Asymmetric double Mach-Zehnder optical fiber disturbance sensing system. DAQ: data acquisition card; IPC: industrial personal computer; C2, C3, 3 dB coupler; C1, C4, optical fiber circulator; PD1, PD2, photoelectric detector; C-PW, CC-PW, Light waves transmit clockwise and anticlockwise^[102].

天津大学为了实现对扰动行为的高精度定位, 研究了具有偏振补偿功能的双马赫-曾德尔光纤扰动传感系统及偏振控制算法, 同时设计了基于广义互相关的定位算法, 实现了高精度定位检测及偏振补偿^[99,100]. 此外, 还将经验模态分解与神经网络相结合, 设计了针对多种扰动行为的模式识别算法, 通过径向基函数(RBF)神经网络可以实现对

外界不同扰动行为的准确判断^[101]. 为了提高M-Z光纤扰动传感系统的应用范围, 我们研究了一种基于非对称双M-Z干涉的光纤扰动传感系统, 如图 15 所示, 利用不同波长光源+DWDM的组合滤除背向散射噪声, 延长传感距离; 并设计了应用于非对称系统的高精度定位算法^[102,103], 目前该系统能够在 120 km 的传感距离下达到 ± 100 m 的定位精度。

目前, 如何进一步减小偏振和噪声的影响, 以实现更长距离的传感和更高精度的定位是面临的主要问题. 凭借其长距离、高分辨率及便于构成智能型网络等优越特性, 干涉型扰动分布传感技术在建筑结构监测、油气管道泄漏监测、输电网安全监测及周界安全监控等领域具有十分广泛的应用前景。

3.2 光频域反射传感技术

基于光纤中背向瑞利散射的 OFDR 技术最开始由德国的 Eickhoff 等^[104]提出, 通常使用具有极窄线宽的可调谐激光器作为系统的光源, 由扫描光源发出的光被分成两路, 分别进入参考臂和被测光纤 (fiber under test, FUT). 其中参考臂一路的光信号作为本振光信号, 并与被测光纤中的背向瑞利散射光信号进行干涉, 由于光频域反射技术中使用的是扫描光源, 因此这两路信号发生的干涉为拍频干涉, 干涉后的拍频信号被探测器接收. 探测到的拍频干涉信号的拍频大小是与被测光纤的距离相互关联的, 对于光频域反射技术中某一时刻探测到的光信号, 则是整个被测光纤上全部拍频信号的集合. 自提出之后, 国内外的诸多研究者都开始了对光频域反射技术的跟进研究. 基于光频域反射技术的应用, 主要可以归为两个方面^[105], 一方面是对被测光纤进行分布式测量, 即对整个光纤链路的损耗、断点、连接点等进行健康监测; 另一方面就是通过光频域反射技术实现光纤传感, 利用光纤作为传感单元的同时兼具传输信号功能, 实现分布式光纤传感。

在光频域反射技术的研究之初, 主要通过该技术进行光纤链路测量, 如 Uttam 等^[106]利用光频域反射技术实现对搭建的基于光纤的光路系统和光纤器件的检测. 此前的研究中虽然利用光频域反射

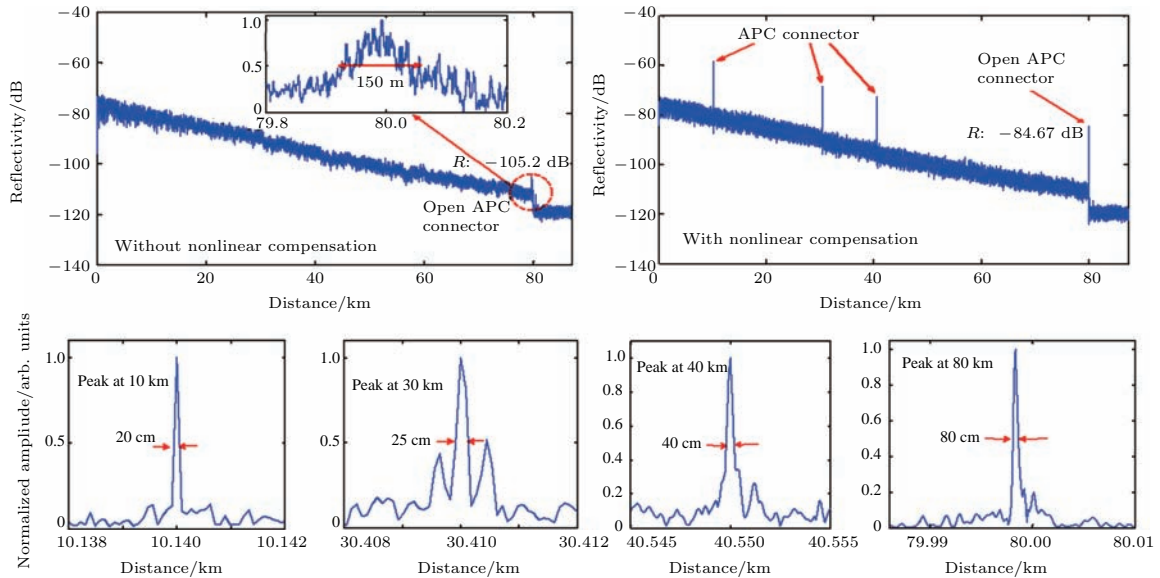


图 16 采用优化去斜滤波器 (deskew filter) 抑制非线性相位噪声结果 测试长度 80 km, APC 接头连接产生的菲涅耳反射点位于 10, 30, 40 km, 末端为 80 km; 由于非线性相位影响, 10, 30, 40 km 不能探测出, 抑制非线性相位噪声后, 全部可探测出; 末端反射点分辨率在抑制非线性相位噪声后提高 187 倍 [110]

Fig. 16. Using deskew filter to restrain nonlinear phase noise, the test length is 80 km, the Fresnel reflection point caused by APC connector located at 10 km, 30 km, 40 km, the end is 80 km. Because of the nonlinear phase, the signal is undetectable at 10 km, 30 km, 40 km. After the nonlinear phase noise restrain, the signal turns to be detectable. The resolution of reflection point increases 187 times after the nonlinear phase is restrained [110].

技术对光纤的测试实现的空间分辨率比较高, 可以达到厘米和毫米量级, 甚至微米量级 [107], 但测试距离尚短, 一般最多都只有十几米的光纤测试长度 [108]. 伴随着研究的不断深入, 利用光频域反射技术实现的测试距离也不断增加. 如天津大学采用去斜滤波技术抑制 OFDR 非线性相位, 实现 80 km 处反射率为 -55 dB 菲涅耳反射的测量, 空间分辨率达 1.6 m [109], 同时将傅里叶变化频域高阶估计与倒谱估计引入去斜滤波技术, 精确估算激光器非线性相位, 使得空间分辨率达 80 cm, 其中末端反射点分辨率在抑制非线性相位噪声后提高 187 倍, 如图 16 [110].

通常光频域反射技术中, 探测的都是强相干信号, 然而当被测光纤的长度在超过光源的相干长度的情况时, 探测弱相干信号在 OFDR 技术中也是可行的. 天津大学 [111] 探测超相干情况下的菲涅耳反射, 实现对 170 km 光纤末端菲涅耳反射峰的探测, 反射点的空间分辨率为 200 m, 如图 17.

基于光频域反射技术的研究, 除了用于分布式光纤链路的测量测试外, 在分布式光纤参量传感方面的应用也至关重要. 天津大学 [112] 通过对光频域信号进行互相关分析, 实现对振动信号的多点传

感, 传感距离为 12 km, 最高可测振动频率为 2 kHz, 空间分辨率为 5 m, 同时将去斜滤波技术引入振动传感领域, 测试距离拓展到 40 km [113]. 此外, 对温度、磁场 [114] 和电流 [115] 进行的分布式传感研究也取得了一定的成果.

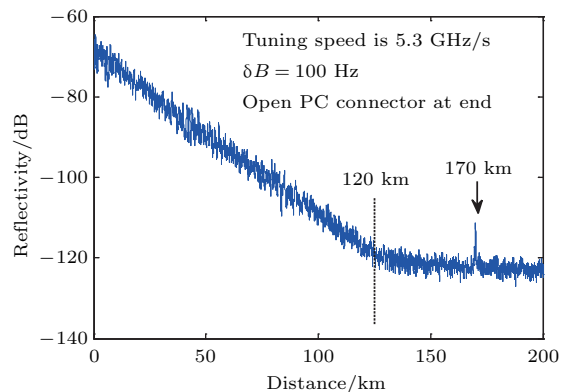


图 17 长度为 170 km 待测光纤的瑞利散射和末端由 FC/PC 接头引起的反射率为 -14 dB 菲涅耳反射测试结果图 OFDR 轨迹在超过 120 km 部分变为平滑, 这是由于瑞利散射信号已经小于系统本底噪声 -120 dB [111]

Fig. 17. The Rayleigh scattering and a -14 dB Fresnel reflection caused by FC/PC connector in a 170 km long optical fiber OFDR track turns to smoothness in the area more than 120 km, because the Rayleigh scattering signal is smaller than the -120 dB background noise of the system [111].

3.3 相干光时域反射仪传感技术

相干光时域反射仪 (Φ -OTDR) 传感技术能实现长距离、全分布式的振动定位和测量, 在国民经济的发展中其优势超越了传统的电传感器、光纤光栅传感器等. 因此, 对 Φ -OTDR 分布式振动传感系统的传感机理、系统结构和解调技术进行深入的探究具有重要的应用价值和学术价值.

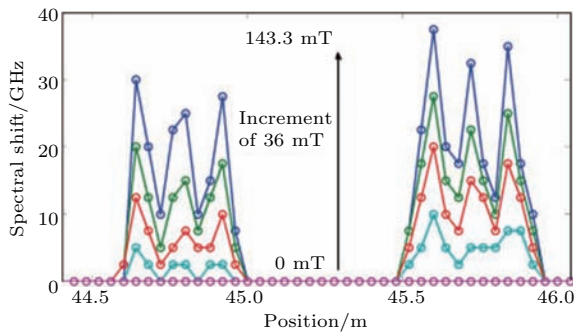


图 18 OFDR 方法用于磁感应强度分布的传感 [114]

Fig. 18. OFDR method used in magnetic induction intensity distribution sensing [114].

1993年, 美国德克萨斯农工大学 (TAMU) 的 Taylor 等 [116] 申请了关于 Φ -OTDR 的首个美国专利. 他发现, 在光纤中注入超窄线宽激光脉冲后, 利用外界振动对后向瑞利散射光相位的调制特性, 可以进行振动测量. 1994年, Juskatis 等 [117] 提出利用 Φ -OTDR 进行入侵 (振动) 检测. Φ -OTDR 的前期研究方向主要集中在其传感机理的研究上. TAMU 的 Park 等 [118] 将 Φ -OTDR 的基本理论模型抽象为: 将光纤分成 N 段, 每小段的空间宽度为单位 ΔL , 将 ΔL 分为 M 个由瑞利散射产生的离散的反射镜, 且每个反射镜的反射率和造成的相位延迟都是随机的独立分布, 该模型解释了 Φ -OTDR 的物理规律, 并通过实验验证了该模型的有效性. 在 Φ -OTDR 的关键光学器件研究方面, TAMU 的 Choi 等 [119] 研究了窄线宽激光器的线宽和频率漂移对系统传感性能的影响, 并研制了掺铒光纤激光器, 使激光器的性能基本能够满足实用需求. 哈尔滨工程大学的 Lü 等 [120] 研究了影响 Φ -OTDR 波形的各种物理参数 (折射率、激光频率和脉宽等) 变化时的相应瑞利散射波形, 通过理论分析和实验得到上述诸参数对瑞利散射波形的影响.

Φ -OTDR 是基于光的干涉原理, 因此得到与振动信号完全对应的瑞利散射光相位, 对于还原振动信号具有重要意义. 2011年, 中国科学院上海光机

所的 Pan 等 [121] 提出了利用数字相干探测的方法, 实时地解调瑞利散射光的相位, 压电陶瓷换能器振动实验证明了解调相位与振动信号的对应情况较好, 相比直接检测的方式 SNR 提升显著. 2013年, 南安普顿大学的 Masoudi 等 [122] 利用非平衡 M-Z 干涉仪, 在 1 km 范围内实现了 500—5000 Hz 的动态应变测量, 并于 2014年报道了该系统对声波的响应能力, 相比之前的 Φ -OTDR [123], 传感性能迈进了一大步.

在 Φ -OTDR 的信号处理方面, 最初为满足入侵监测的需求, 一般先将原始的瑞利散射曲线通过平均以部分抵消探测器的热噪声影响, 然后对平均后的相邻两个周期的瑞利散射曲线进行相减, 得到随空间分布的差值曲线. 这种方法实施起来较简单, 可以比较直观地反映系统的性能和对扰动的灵敏度, 但差值曲线并不能较好地体现扰动/振动信号的时域特征. TAMU 的 Madsen 等 [124] 利用时频分析的方法对入侵信号的特征进行初步探索, Ottawa 大学的 Qin 等 [125] 利用连续小波变换的方法分析非静态的振动信号, 并进一步研究了小波分析在扰动信号提取中的应用 [126]. 电子科技大学的 Wu 等 [127] 研究了小波分析对差值曲线的去噪作用, 并提出了一种基于时间序列奇异谱特征的扰动检测方法, 能够有效排除声波及瞬时高频噪音等干扰信号的影响, 取得了较好的效果 [128].

3.4 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术

布里渊散射是入射光与光纤内的声波相互作用而形成的, 该声波等效于一个以一定速度移动的密度光栅, 因此可将布里渊散射看作是入射光在移动光栅上的散射, 由于多普勒效应, 散射光的频率不再等于入射光频率, 该频率差称为布里渊频移. 布里渊散射是在 20 世纪初由布里渊提出的, 1964年 Chiao 在实验上发现. 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术通过检测布里渊频移来测量温度或应变. 与其他分布式传感技术相比, 它是一种起步相对较晚的技术. 1989年, Horighguchi 和 Culverhouse 首次提出利用布里渊频移可实现温度和应力的分布式测量. 1990年, Kurashima 和 Tateda [129] 分别测得布里渊频移与光纤温度和应力之间的关系, 指出不同光纤条件下, 相同的温度和应变引起的布里渊频移不同, 但是频移与温度或应变呈线性

关系. 1992年, Kurashima等根据这种关系提出了基于自发布里渊散射的光纤传感技术. 随着技术的不断发展和日益成熟, 目前商用化的系统产品相继出现, 如日本的Ando公司已开发出基于自发布里渊散射的光纤应变测量仪, 应变精度达到 $\pm 0.01\%$, 空间分辨率1 m^[130]; Ottawa大学的Bao等^[131]开发出用于大型发电机定子在线监测的高空间分辨率分布式布里渊光纤传感系统, 实现了3 cm周期的分布式横向位移测量; 2010年, 南京大学研制出基于布里渊散射的分布式光纤传感系统样机. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器正朝着高空间分辨率、高测量精度和大测量范围发展.

3.5 基于光纤拉曼散射的分布式传感技术

拉曼散射光最早由印度科学家拉曼(Raman)于1928年发现, 后来随着激光器的发展, 推动了人们对拉曼散射的研究. 当光在光纤中传播时, 入射光波发生非线性散射, 产生斯托克斯拉曼散射光和反斯托克斯拉曼散射光波, 其中的斯托克斯拉曼散射光强受温度影响比较小, 而反斯托克斯拉曼散射光对温度敏感. 相比于光纤布里渊传感, 拉曼散射效应只对温度敏感, 可以克服温度与应变的交叉敏感, 可应用在各种极端环境, 比如核电站、强磁场的环境, 或者有应力的地方, 比如桥梁、建筑等. 1981年, 英国南安普顿大学率先提出其用于分布式光纤传感的设想, 并由Hartog等^[132]于1983年研制出相应实验装置. 1985年, 英国Dankin等^[133]使用半导体激光器作为光源, 并用雪崩光电二极管及石英光纤搭建了系统, 首次进行了基于受激拉曼散射效应的分布式光纤温度传感器测温实验. 这一实验显示了拉曼式测温系统的独特优势. 随后围绕系统的测量范围、测温范围、空间分辨率、温度分辨率开展了大量研究.

基于拉曼散射效应的分布式光纤温度传感方案^[134,135]的主要思想是利用光时域反射技术实现定位和利用斯托克斯拉曼散射光强和反斯托克斯拉曼散射光强解调温度, 从而得到光纤上的温度场信息. 光纤的色散特性会造成光时域反射曲线的走离效应, 为了解决这个问题, Suh和Lee^[136]采用双光源方案, 如图19所示. 其中主激光器产生的光纤背向反斯托克斯拉曼散射波长等于副激光器的光纤斯托克斯拉曼散射波长. 用副激光器的斯托克斯拉曼散射光强和主激光器的反斯托克斯拉曼散

射光强解调温度信息, 有效提高了传感精度和分辨率. 中国计量学院在2009年提出了拉曼相关双波长光源自校正分布式光纤拉曼温度传感器; 2010年提出了新型色散与损耗光谱自校正分布式光纤拉曼温度传感器^[137].

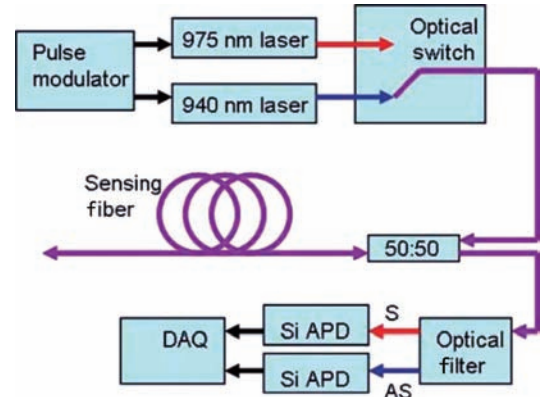


图19 Suh和Lee的解决方案^[136]

Fig. 19. Solution of Suh and Lee^[136].

同时, 国内外许多商业公司也推动了该传感系统的商业化, 对其普及和广泛利用起到了显著作用. 未来, 基于光纤受激拉曼散射效应的分布式光纤温度传感技术将与新的信号采集处理技术、新型组网技术相结合, 向着高精度、超长距离、高可靠性、多参量和智能化的方向继续发展.

4 光纤智能传感网

分立式和分布式光纤传感技术的研究, 推动着光纤传感系统向着集成化和网络化发展, 光纤智能传感网也随之成为新的研究热点. 光纤智能传感网是由各种分立式光纤传感器和分布式光纤传感器按照一定的拓扑结构组成的具有自诊断和自愈功能的网络结构. 其拓扑结构的优劣决定了传感器的加载复用规模、测量参量的多样性以及传感网的整体鲁棒性; 其智能化体现在控制系统对于传感网运行状态的实时掌握、故障的定位诊断及传感器自愈能力等方面的自动化程度. 目前国内外针对光纤传感网的研究主要集中在以下方面: 增加传感器的复用数量、设计鲁棒性更好的传感网拓扑结构以及实现传感网的智能控制^[138,139].

针对光纤传感网缺少鲁棒性量化评价标准的研究现状, 天津大学提出了光纤传感网鲁棒性量化评估模型, 并基于蒙特卡罗方法提出了误差估计, 用实验结果和理论模拟值验证了该鲁棒性评价方

法的可行性. 该模型可以对总线型、星型、环型等各种复杂拓扑结构进行评价和建模^[140,141].

随后又提出了一种光纤光栅传感器的无源自愈传感网^[142,143], 该拓扑结构由一个星型子网和环型子网构成, 如图 20 所示. 从理论上分析了当传感网发生多处故障时的自愈方式, 并且利用实验进行了验证, 给出了通过观察解调信号推导传感器状态的量化方法. 无源传感拓扑结构即拓扑结构中不含任何中继放大或外界电信号, 该特性在需要防电磁干扰等的恶劣环境下显得尤为重要.

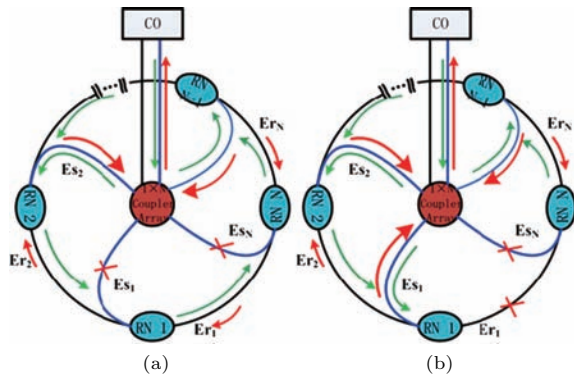


图 20 无源传感拓扑结构自愈功能示意图^[143]

Fig. 20. Self-healing capabilities of passive sensing topological structure^[143].

5 结 论

光纤传感技术自出现之后的几十年来蓬勃发展, 现在已经成为跨越光学、光电子学、材料学、电子技术、计算机技术、通信技术、土木工程、生物化学等多学科多门类的系统科学. 随着云计算、云存储、大数据等新技术的诞生, 光通讯网络的传输速度和容量不断扩大, 以及纳米技术、材料科学的日益发展, 光纤传感技术面临着诸多新问题、新挑战, 比如对高速度大规模传感网络的需求, 对微纳尺度超小超轻传感器的需求, 以及面向深空、深海、深地等极端环境的应用需求等. 因此, 光纤传感在当今时代仍然是一个充满挑战的研究领域在与新材料、新技术的碰撞中, 必将迸发出新的生机和活力.

参考文献

[1] Maiman T H 1960 *Nature* **187** 4736
 [2] Kao K C, Hockham G A 1966 *Proc. IEE* **113** 7
 [3] Li C 2012 *Technology of Optical Fibre Sensor* (Beijing: Science Press) p1 in Chinese [李川 2012 光纤传感器技术 (北京: 科学出版社) 第 1 页]

[4] Kersey A D, Berkoff T A 1992 *Electron. Lett.* **28** 236
 [5] Falciai R, Mignani A G, Vannini A 2001 *Sens. Actuat. B* **74** 74
 [6] Guo T, Ivanov A, Chen C, Albert J 2008 *Opt. Lett.* **33** 1004
 [7] Xiao G, Sun F, Zhang Z, Lu Z, Liu J, Fang W 2007 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **49** 668
 [8] Sano Y, Toshihiko Y 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 132
 [9] Kersey A D, Berkoff T, Morey W 1993 *Opt. Lett.* **18** 1370
 [10] Liu T G, Wang S, Jiang J F, Liu K, Yin J D 2014 *Chinese J. Sci. Instrum.* **8** 1681 (in Chinese) [刘铁根, 王双, 江俊峰, 刘琨, 尹金德 2014 仪器仪表学报 **8** 1681]
 [11] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, Ding H 2004 *IEEE Photon. Tech. L.* **16** 2505
 [12] Jiang J F, He P, Liu T G, Liu K, Wang S, Pan Y H, Yu L, Yan J L 2015 *Acta Opt. Sin.* **10** 82 (in Chinese) [江俊峰, 何盼, 刘铁根, 刘琨, 王双, 潘玉恒, 俞琳, 闫金玲 2015 光学学报 **10** 82]
 [13] Jiang J F, Yan J L, Wang S, Liu K, Liu T G, Zang C J, Xie R W, He P, Chu Q L, Pan Y H 2016 *Acta Opt. Sin.* **2** 1 (in Chinese) [江俊峰, 闫金玲, 王双, 刘琨, 刘铁根, 臧传军, 谢仁伟, 何盼, 楚奇梁, 潘玉恒 2016 光学学报 **2** 1]
 [14] Lee C E, Taylor H F 1988 *Electron. Lett.* **24** 193
 [15] Wang A, Gollapudi S, Murphy K A 1992 *Opt. Lett.* **17** 1021
 [16] Shen F, Huang Z, Zhu Y 2005 *Proceedings of the SPIE Sensors for Harsh Environments II* 59980H
 [17] Gangopadhyay T K, Henderson P J 1999 *Appl. Opt.* **38** 2471
 [18] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M 1991 *Opt. Lett.* **16** 4
 [19] Liao C, Liu S, Xu L 2014 *Opt. Lett.* **39** 2827
 [20] Sun B, Wang Y, Qu J 2015 *Opt. Express* **23** 1906
 [21] Liu T G, Yin J D, Jiang J F, Liu K, Wang S, Zou S L 2015 *Opt. Lett.* **40** 1049
 [22] Yin J D, Liu T G, Jiang J F, Liu K, Wang S, Qin Z Q, Zou S L 2014 *IEEE Photon. Tech. L.* **26** 2070
 [23] Bhatia V, Murphy K A, Claus R O 1995 *Smart Mater. Struct.* **4** 93
 [24] Wang A, Miller M S, Plante A J 1996 *Appl. Opt.* **35** 15
 [25] Xiao H, Huo W, Deng J 1999 *Proceedings of the SPIE Harsh Environment Sensors II*
 [26] Jiang L J, Jiang J F, Liu T G 2012 *Acta Photon. Sin.* **41** 3 (in Chinese) [姜丽娟, 江俊峰, 刘铁根 2012 光子学报 **41** 3]
 [27] Liu T, Fernando G F 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 1275
 [28] Jiang Y, Tang C 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 106105
 [29] Al-Chalabi S A, Culshaw B, Davies D E N 1983 *First International Conference on Optical Fibre Sensors* 26
 [30] Li L, Liu T G, Jiang J F, Yin J D, Jiang L J, Meng X E, Liu Y 2012 *J. Optoelectron. Laser* **1** 67 (in Chinese) [李磊, 刘铁根, 江俊峰, 尹金德, 姜丽娟, 孟祥娥, 刘宇 2012 光电子·激光 **1** 67]
 [31] Meng X E, Jiang J F, Liu T G, Liu K, Yin J D, Wang S H, Wang S, Zhang Y M, Wu F, Qin Z Q 2012 *Acta Opt. Sin.* **11** 290 (in Chinese) [孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 刘琨, 尹金德, 王少华, 王双, 张以谟, 吴凡, 秦尊琪 2012 光学学报 **11** 290]

- [32] Jiang J F, Wu F, Liu T G, Liu K, Wang S, Yin J D, Qin Z Q, Zou S L, Zhang X Z 2014 *Acta Opt. Sin.* **2** 224 (in Chinese) [江俊峰, 吴凡, 刘铁根, 刘琨, 王双, 尹金德, 秦尊琪, 邹盛亮, 张学智 2014 光学学报 **2** 224]
- [33] Jiang J, Wang S, Liu T 2012 *Opt. Express* **20** 18117
- [34] Wang S, Jiang J, Liu T 2012 *IEEE Photon. Tech. L.* **24** 1390
- [35] Wang S, Liu T, Jiang J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3169
- [36] Wang S, Liu T, Jiang J 2014 *Opt. Lett.* **39** 1827
- [37] Yin J D, Liu T G, Jiang J F, Liu K, Wang S, Wu F, Ding Z Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 3751
- [38] Lefèvre H C (translated by Zhang G C, Wang W) 2002 *The Fiber-Optic Gyroscope* p10 (in Chinese) [Lefèvre H C 著 (张桂才, 王巍 译) 2002 光纤陀螺仪 (北京: 国防工业出版社) 第10 页]
- [39] Zhang G C 2008 *Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope* (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [张桂才 2008 光纤陀螺原理与技术 (北京: 国防工业出版社) 第7 页]
- [40] Vali V, Shorthill R 1976 *Appl. Opt.* **15** 1099
- [41] Sanders G A, Szafraniec B, Liu R Y 1996 *SPIE Proceedings* **2837** 61
- [42] Volk C, Lincoln J, Tazartes D 2001 *Northrop Grumman* **382**
- [43] Barbour N M 2010 *NATO RTO Lecture Series*
- [44] Heckman D W, Baretela L 2000 *Position Location and Navigation Symposium IEEE* 404
- [45] Dandridge A, Cogdell G B 1991 *IEEE Lcs the Magazine of Lightwave Communications Systems* **2** 81
- [46] Gao S, Zhang C X, Yan T Y 2006 *Well Logging Technology* **30** 571 (in Chinese) [高爽, 张春熹, 颜廷洋 2006 测井技术 **30** 571]
- [47] Heckman D Y, Baretela M 2000 *IEEE AES Systems* **11** 23
- [48] Schmidt G T 2004 *Advances in Navigation Sensors and Integration Technology* RTO-EN-SET-064
- [49] Schmidt G T 2008 *Advances in Navigation Sensors and Integration Technology* RTO-EN-SET-1
- [50] Honthaas J, Buret T, Paturel Y 2006 *The 18th International Optical Fiber Sensors Conference* ME3
- [51] Li Z H, Meng Z, Liu T G, Yao X S 2013 *Opt. Express* **21** 2521
- [52] Li Z H 2012 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [李志宏 2012 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [53] Peterson N C, Kurylo M J, Braun W 1971 *J. Opt. Soc. Am.* **61** 746
- [54] Hernandez-Cordero J, Morse T F 1999 *Proc. SPIE* **3860** 171
- [55] George S, Kathryn A, Hong B Y 2001 *Meas. Sci. Technol.* **12** 843
- [56] Zhang Y, Zhang M, Jin W 2003 *Opt. Commun.* **220** 361
- [57] Liu K, Jing W C, Peng G D 2008 *IEEE Photon. Tech. L.* **20** 1515
- [58] Zhang H W, Lu Y, Duan L C 2014 *Opt. Express* **22** 24545
- [59] Fomin A, Zavlev T, Rahinov I 2015 *Sens. Actuat. B* **210** 431
- [60] Yu L, Liu T G, Liu K 2016 *Sens. Actuat. B* **228** 10
- [61] Jorgenson R, Yee S 1993 *Sens. Actuat. B* **12** 213
- [62] Wang T, Liu T, Liu K 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 1
- [63] White I W, Oveys H, Fan X 2006 *Opt. Lett.* **31** 1319
- [64] White I M, Zhu H, Suter J D, Hanumegowda N M, Oveys H, Zourob M 2007 *Sens. J.* **7** 28
- [65] Gouveia M A, Avila P D, Marques T H, Torres M C, Cordeiro C M 2015 *Opt. Express* **23** 10643
- [66] O' Shea D, Junge C, Pöllinger M, Vogler A, Rauschenbeutel A 2011 *Appl. Phys. B* **105** 129
- [67] Sumetsky M, Dulashko Y, Windeler R S 2010 *Opt. Lett.* **35** 1866
- [68] Ji Q, Jiang J F, Liu T G, Liu K, Liu W H, Zhang J, Chen W J 2013 *Acta Opt. Sin.* **2** 241 (in Chinese) [姬强, 江俊峰, 刘铁根, 刘琨, 刘文辉, 张晶, 陈文杰 2013 光学学报 **2** 241]
- [69] Jiang J F, Zhang J, Liu T G, Liu K, Yu z, Zhang X Z, Liu W H, Chen W J 2013 *Acta Opt. Sin.* **12** 298 (in Chinese) [江俊峰, 张晶, 刘铁根, 刘琨, 于哲, 张学智, 刘文辉, 陈文杰 2013 光学学报 **12** 298]
- [70] Yu Z, Liu T, Jiang J 2014 *SPIE COS Photonics Asia International Society for Optics and Photonics* 92740L-92740L-7.
- [71] Zhang X, Liu T, Jiang J 2014 *SPIE COS Photonics Asia International Society for Optics and Photonics* 92740P-92740P-6
- [72] Chen L X, Huang X G, Zhu J H, Li G C, Lan S 2011 *Opt. Lett.* **36** 2761
- [73] Hu T, Zhao Y, Li X, Chen J, Lü Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 392
- [74] Chen Y, Han Q, Liu T 2013 *Opt. Lett.* **38** 3999
- [75] Chen Y, Han Q, Liu T 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 1
- [76] Li L, Han Q, Chen Y 2014 *IEEE Sens. J.* **14** 1749
- [77] Takada K, Yokohama I, Chida K, Noda J 1987 *Appl. Opt.* **26** 1603
- [78] Youngquist R C, Carr S M, Davies D E 1987 *Opt. Lett.* **12** 158
- [79] Fercher A F, Mengedoht K, Werner W 1988 *Opt. Lett.* **13** 186
- [80] Huang D, Swanson E A, Lin C P 1991 *Science* **254** 1178
- [81] Fercher A F, Hitzinger C K, Drexler W 1993 *Am. J. Ophthalmol.* **116** 113
- [82] Swanson E A, Izatt J A, Hee M R, Huang D, Lin C P, Schuman J S 1993 *Opt. Lett.* **18** 1864
- [83] Izatt J A, Hee M R, Swanson E A, Lin C P, Huang D, Schuman J S, Puliafito C A, Fujimoto J G 1994 *Arch. Ophthalmol. Chic.* **112** 1584
- [84] Colston B, Sathyam U, Dasilva L, Everett M, Stroeve P, Otis L 1998 *Opt. Express* **3** 230
- [85] Baumgartner A, Dichtl S, Hitzinger C K, Sattmann H, Robl B, Moritz A 1999 *Caries Res.* **34** 59
- [86] Tearney G J, Boppart S A, Bouma B E, Brezinski M E, Weissman N J, Southern J F 1996 *Opt. Lett.* **21** 543
- [87] Bouma B E, Tearney G J, Compton C C, Nishioka N S 2000 *Gastrointest Endosc.* **51** 467
- [88] Jang I K, Bouma B E, Kang D H, Park S J, Park S W, Seung K B 2002 *J. Am. Coll. Cardiol.* **39** 604

- [89] Zhou Y H, Liu T G, Ding Z Y, Tao K Y, Liu K, Jiang J F, Liu Z X, Jiang Y J, Kuang H 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 1
- [90] Wang L Z 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [王龙志 2013 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [91] Meng Z, Yao X S, Liang Y, Yao H, Liu T G, Lan S F, Wang J J 2008 *Chin. J. Sens. Actuat.* **21** 1858 (in Chinese) [孟卓, 姚晓天, 梁燕, 姚晖, 刘铁根, 兰寿锋, 王佳佳 2008 传感技术学报 **21** 1858]
- [92] Meng Z 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [孟卓 2008 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [93] Wu J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [吴俊 2007 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [94] Russell S J, Dackin J P 1999 *Proc. SPIE* **3747** 580
- [95] Yuan W, Pang B, Bo J, Qian X 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 1032
- [96] Kizlik B 2002 *Proc. Int. Confer.* **128**
- [97] Liang S, Zhang C, Lin W, Li L, Li C, Feng X, Lin B 2009 *Opt. Lett.* **34** 1858
- [98] Xie S, Zou Q, Wang L, Zhang M, Li Y, Liao Y 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 362
- [99] Chen Q, Liu T G, Liu K, Jiang J F, Shen Z, Ding Z Y, Hu H F, Huang X D, Ma C Y 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 1
- [100] Chen Q, Liu T G, Liu K, Jiang J, Ding Z Y, Zhang L, Li Y, Pan L, Ma C Y 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 3135
- [101] Liu K, Tian M, Liu T 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4885
- [102] Ma C, Liu T, Liu K, Jiang J, Ding Z, Pan L, Tian M 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 2235
- [103] Ma C, Liu T, Liu K 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3785
- [104] Eickhoff W, Ulrich R 1981 *Appl. Phys. Lett.* **39** 693
- [105] Ding Z Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [丁振扬 2013 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [106] Uttam D, Culshaw B 1985 *J. Lightwave Technol.* **3** 971
- [107] Myoung S, Hee P, Byoung Y 2003 *IEEE Photon. Tech. L.* **15** 266
- [108] Dolfi D W, Nazarathy M, Newton S A 1988 *Opt. Lett.* **13** 678
- [109] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, Du Y, Liu K, Jiang J F, Meng Z, Chen H X 2013 *Opt. Express* **21** 3826
- [110] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, Feng B W, Li X B, Liu K, Jiang J F 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 1
- [111] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G 2013 *IEEE Photon. Tech. L.* **25** 202
- [112] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G 2012 *Opt. Express* **20** 28319
- [113] Liu T G, Du Y, Ding Z Y, Liu K, Zhou Y H, Jiang J F 2016 *IEEE Photon. Tech. L.* **28** 771
- [114] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, Liu K, Feng B W, Jiang J F 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 012401
- [115] Ding Z Y, Du Y, Liu T G, Liu K, Feng B W, Jiang J F 2015 *IEEE Photon. Tech. L.* **27** 2055
- [116] Taylor H F, Lee C E 1993 U.S. Patents 5194847 [1993-03-16]
- [117] Juskaitis R, Mamedov A M, Potapov V T 1994 *Opt. Lett.* **19** 225
- [118] Park J, Lee W, Taylor H F 1998 *Int. Soc. Opt. Photon.* **3555** 49
- [119] Choi K N, Taylor H F 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 386
- [120] Lü Y L, Xing Y W 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 819001 (in Chinese) [吕月兰, 行永伟 2011 光学学报 **31** 819001]
- [121] Pan Z, Liang K, Ye Q 2011 *Communications and Photonics Conference and Exhibition ACP. Asia IEEE.* **1**
- [122] Masoudi A, Belal M, Newson T P 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 085204
- [123] Masoudi A, Belal M, Newson T P 2014 *Int. Soc. Opt. Photon.* **9157** 91573T
- [124] Madsen C K, Bae T, Snider T 2007 *Int. Soc. Opt. Photon.* **6770** 67700K
- [125] Qin Z, Chen L, Bao X 2012 *Opt. Express* **20** 20459
- [126] Qin Z, Chen L, Bao X 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 542
- [127] Wu H, Wang J, Wu X 2012 *Sensor Lett.* **10** 1557
- [128] Li X Y, Peng Z P, Yao Y J 2013 *Acta Photon. Sin.* **43** 428001 (in Chinese) [李小玉, 彭正谱, 姚云江 2013 光子学报 **43** 428001]
- [129] Kurashima T, Tateda M 1990 *Appl. Opt.* **29** 2219
- [130] Kee H H, Lees G P, Newson T P 2000 *Opt. Lett.* **25** 695
- [131] Dong Y, Chen L, Bao X 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1161
- [132] Hartog A H 1983 *IEEE J. Lightwave Technol.* **1** 498
- [133] Hartog A H, Leach A P, Gold M P 1985 *Electron. Lett.* **21** 1061
- [134] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W 1985 *Electron. Lett.* **21** 569
- [135] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W 1986 *Tech. Symp.* **566** 249
- [136] Suh K, Lee C 2008 *Opt. Lett.* **33** 1845
- [137] Zhang Z X, Jin S Z, Wang J F, Liu H L, Sun Z Z, Gong H P, Yu X D, Zhang W S 2010 *Chin. J. Lasers* **11** 2749 (in Chinese) [张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 刘红林, 孙忠周, 龚华平, 余向东, 张文生 2010 中国激光 **11** 2749]
- [138] Xia L, Cheng R, Li W 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 323
- [139] Amiri I S, Alavi S E, Ali J 2015 *Int. J. Commun. Syst.* **28** 147
- [140] Zhang H X, Gong Y H, Jia D G 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 1388
- [141] Zhang H X, Gong Y H, Liu T G 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 1
- [142] Jia, D G, Zhang Y L, Chen Z T 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 1
- [143] Jia D G, Zhang Y L, Chen Z T 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 1

SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research*

Liu Tie-Gen[†] Yu Zhe Jiang Jun-Feng Liu Kun Zhang Xue-Zhi Ding Zhen-Yang
Wang Shuang Hu Hao-Feng Han Qun Zhang Hong-Xia Li Zhi-Hong

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology Ministry of Education, Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 28 November 2016; revised manuscript received 21 February 2017)

Abstract

With the superiority of anti-electromagnetic interference, corrosion resistance, light quality, small size and so on, optical fiber sensing technology is widely used in aerospace industry, petrochemical engineering, power electronics, civil engineering and biological medicine. It can be divided as discrete and distributed. Discrete optical fiber sensing utilizes fiber sensitive element as sensors to detect the quantity to be measured. Optical spectrum, light intensity and polarization are usually used as the sensitivity parameter because they can be modulated by parameter such as rotation, acceleration, electromagnetic field, temperature, pressure, stress, stress, vibration, humidity, viscosity, refractive index and so on. Fiber works as the channel and links the fiber sensor and demodulating equipment. After a long period of research, the discrete optical fiber sensing technology stretch out many branches, we discussed the most representative ones as follows, the fiber grating sensing technique, the fiber fabry perot sensing technique, the fiber gyroscope sensing technique, the fiber intracavity sensing technique, the fiber surface plasma sensing technique, hollow-core fiber whispering gallery mode sensing technique, magnetic fluid fiber sensing technique and fiber-based optical coherence tomography sensing technique. Based on optical effect as rayleigh scattering, Raman scattering and Brillouin scattering, distributed fiber sensing system uses fiber itself as a sensor, when the vibration, stress, voice or temperature acts on the fiber changes, the optical signal transfers inside the fiber will change accordingly. The fiber distributes in a large range and a long distance, then the signal can be located at different positions and realize the multi-position measurement. We discussed the main distributed fiber sensing technologies as follows, the interferometric disturbance fiber sensing technology, the optical frequency domain reflectometry fiber sensing technology, the Φ -optical time domain reflectometer fiber sensing technology, the optical fiber Brillouin sensing technology and the optical fiber Raman sensing technology. The development of technology is promoting the integration and network of optical fiber sensing, now it also becomes a research hotspot. Fiber optic smart sensor network is formed by various discrete and discrete optical fiber sensors in certain topological structure with the function of self-diagnosis and self-healing. Current research concentrates in the following areas, the increase of the multiplex sensor number, the topological structure with higher robustness and the intelligent control of sensing network. In this paper, we discuss the origination, development and research progress of discrete, distributed optical fiber sensing technologies and optical fiber sensing network technology, and the future research direction is also prospected.

Keywords: optical fiber sensing, discrete optical fiber sensing, distributed optical fiber sensing, sensor network

PACS: 07.60.Vg, 07.07.Df, 87.19.lt

DOI: 10.7498/aps.66.070705

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61675152, 61227011, 61378043, 61475114, 61505139, 61505138), and the National Instrumentation Program of China (Grant No. 2013YQ030915).

[†] Corresponding author. E-mail: tgliu@tju.edu.cn