

用于动态应变测量的快速分布式布里渊光纤传感

周登望¹, 王本章¹, 巴德欣¹, 徐金龙², 徐鹏柏¹, 姜桃飞¹, 张东昱², 李惠², 董永康¹

¹哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 近些年, 分布式布里渊光纤传感因具有分布式应变和温度的测量能力, 以及在结构健康监测领域的重要应用而受到广泛的研究。在多种传感方案中, 布里渊光时域分析(BOTDA)技术具有信噪比好、空间分辨率高、传感距离远等优点, 受到广泛关注。传统的 BOTDA 系统平均和扫频过程比较费时, 只适宜进行静态或缓慢的应变测量。通过分析 BOTDA 系统的分布式传感原理, 总结了限制其快速分布式传感测量的主要因素。针对这些限制因素, 综述了近期快速 BOTDA 系统取得的一系列的进展, 主要包括基于偏振补偿技术的快速 BOTDA 系统、基于光学捷变频技术的快速 BOTDA 系统、基于斜坡法的快速 BOTDA 系统、基于光学啁啾链的快速 BOTDA 系统、基于光学频率梳技术的快速 BOTDA 系统, 指出通过单一或者多个新技术组合而成的快速 BOTDA 系统具有更好的性能和更广阔的应用前景。

关键词 传感器; 非线性光纤光学; 受激布里渊散射; 振动分析

中图分类号 O437.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328005

Fast Distributed Brillouin Optical Fiber Sensing for Dynamic Strain Measurement

Zhou Dengwang¹, Wang Benzhang¹, Ba Dexin¹, Xu Jinlong², Xu Pengbai¹, Jiang Taofei¹,
Zhang Dongyu², Li Hui², Dong Yongkang¹

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Recently, distributed Brillouin optical fiber sensors have been extensively studied and discussed for the capacity to measure distributed strain and temperature, as well as important applications in the field of structural health monitoring. In several optical fiber sensing schemes, Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) is widely concerned due to its good signal-to-noise ratio, high spatial resolution, and long-range sensing distance. However, due to the time-consuming averaging and frequency-sweeping processes, the classical BOTDA systems are suitable for static or slow-varying strain measurements. In this paper, we analyze the operation principle of BOTDA system and discuss some main factors for limiting fast measurement. Then, we summarize and analyze the dynamic measurement methods based on fast BOTDA, which are polarization compensation technique, frequency-agile technique, slope-assisted method, optical chirp chain technique, optical frequency comb technique. It is pointed out that the fast BOTDA system consisted of a single or multiple new techniques, has a better performance and a wider application prospect.

Key words sensors; nonlinear fiber optics; stimulated Brillouin scattering; vibration analysis

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 190.4370; 290.5900; 120.7280

收稿日期: 2017-10-31; 收到修改稿日期: 2018-01-02

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2017YFF010870000)、国家自然科学基金(61575052, 61308004)

作者简介: 周登望(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感和微波光子学方面的研究。E-mail: cishixitie@163.com

导师简介: 董永康(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学、光纤传感和结构健康监测方面的研究。

E-mail: aldendong@163.com(通信联系人)

1 引 言

自 20 世纪 60 年代以来,伴随着激光器和光纤的发明及应用,光纤传感技术也快速发展起来。目前,光纤传感技术已广泛应用于土木结构健康监测、现代工业控制及国防安全等诸多领域。与传统电阻式、电容式等电子传感技术相比,光纤传感技术具有明显的优势:1)光纤既是损耗很小的传光介质,又是灵敏的传感器件,可以认为是由成千上万个传感单元串联而成,因此能够进行长距离和分布式的传感测量;2)光纤易于接入全光网络,而且质量轻、体积小、便于布设;3)光纤具有抗电磁干扰、耐腐蚀的特性,能够在恶劣的环境下测量;4)光纤传感器具有分辨率高、灵敏度高、测量范围宽等优点^[1]。由于光纤传感器具有以上优点,因此在现代化的工程项目中,都离不开各式各样的光纤传感器。值得注意的是,在现代工业及基础设施的结构健康监测中,急需一种可以实时监测应变或温度信息的分布式超快测量技术,因而光纤传感器可以应用于此。

自 20 世纪 90 年代以来,基于布里渊散射的分布式光纤传感器被广泛报道^[2-5]。通常地,两束光波(抽运光和探测光)相向注入待测光纤(FUT),当两束光波的频率失谐量接近 FUT 的布里渊频移(BFS)时,由于受激布里渊散射(SBS)效应^[6],光能量从高频光波转移到低频光波。布里渊增益谱(BGS)可以通过扫频获得,再通过洛伦兹曲线或高斯曲线拟合获得光纤的 BFS。值得注意的是,由于 BFS 和光纤的应变及温度呈线性关系^[2, 4, 7-8],因此可以通过解调 BFS 来计算出对应的应变或温度。

基于布里渊散射的光纤传感方案主要包括:布里渊光时域分析(BOTDA)技术^[9-14]、布里渊光时域反射(BOTDR)技术^[15-17]、布里渊光相关域分析(BOCDA)技术^[5, 7, 18-22]、布里渊光相关域反射(BOCDR)技术^[5, 23-25]、布里渊光频域分析(BOFDA)技术^[26-27]和布里渊光频域反射(BOFDR)技术^[28]。采用反射技术的光纤传感方案,其布里渊信号较弱,信噪比(SNR)差;采用光相关域技术的光纤传感方案,通常采用点式传感,需要通过扫描相关峰(传感点)的位置^[5, 23, 25]才能获得分布式的应变或温度测量,这样会极大地限制动态应变的采样率;采用光频域技术的光纤传感方案,光波调制及解调算法较复杂。

本文主要针对传统的 BOTDA 系统测量时间较长,仅适用于静态或缓慢变化应变测量的局限,从

理论上分析 BOTDA 系统,并综述近些年 BOTDA 系统在快速分布式应变测量方面的进展。

2 基本原理

2.1 受激布里渊散射

光束通过某一介质,当传输介质光学特性不均匀时,就会产生光散射现象^[6]。当入射光功率超过受激布里渊散射阈值时,入射光能量就会大量转移给后向传播的散射光(斯托克斯光),由于存在多普勒效应,斯托克斯光有一个 BFS。对于普通的单模光纤,BFS^[10, 29-30]的公式为

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2n_{\text{eff}}V_A}{\lambda_p}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; V_A 为声波在光纤中的传播速度; λ_p 为抽运光波长。值得注意的是,FUT 的 BFS 与光纤轴向应变的改变量和温度的改变量呈现出良好的线性关系^[31],其表达式为

$$\nu_B = C_B^{\epsilon} \Delta\epsilon + C_B^T \Delta T + \nu_{B0}, \quad (2)$$

式中 C_B^{ϵ} 为应变系数; $\Delta\epsilon$ 为应变的改变量; C_B^T 为温度系数; ΔT 为温度的改变量; ν_{B0} 为初始光纤 BFS。在单一变量的情况下,通过测量光纤的 BFS,利用(2)式可以计算出对应的应变的改变量和温度的改变量。

2.2 BOTDA 系统的物理模型

传统的 BOTDA 系统(图 1)通常是基于“抽运-探测法”^[4, 9, 12, 32-34]实现的。如图 1(a)所示,高频抽运光调制成高峰值功率的脉冲光,低频探测光为弱功率的连续光(CW),抽运光和探测光以相对的方向注入 FUT。如图 1(b)所示,由于 SBS 效应,当抽运光和探测光的频差接近 FUT 的 BFS 时,抽运光的能量会转移给探测光,使得探测光放大。首先,由

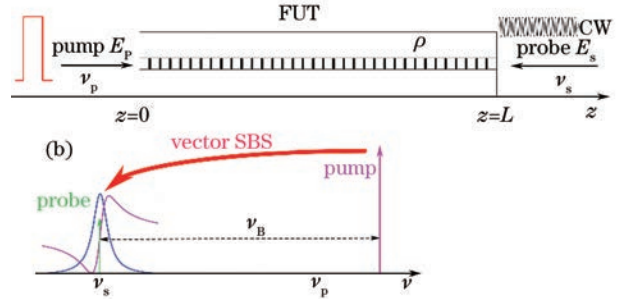


图 1 传统的 BOTDA 系统原理示意图。

(a) 时域关系; (b) 频域关系

Fig. 1 Schematic of classical BOTDA system.

(a) Time-domain relationship; (b) frequency-domain relationship

于抽运光使用的是脉冲光,因此通过确定探测光放大部分的起始点即可精确定位光纤的空间位置。对位置的定位精度(即空间分辨率) $c\tau/(2n)$ 与抽运脉冲光的脉宽 τ 有关。然后,对探测光进行扫频,即可获得FUT的分布式布里渊增益谱(BGS)或布里渊相移谱(BPSS)。最后,通过洛伦兹曲线或者高斯曲线拟合的方法获得BFS,从而计算出分布式应变。

麦克斯韦波动方程可以描述抽运光和探测光的光场,Navier-Stokes方程给出光纤介质声波场的变化。在忽略横向场变化并采用慢变包络近似的情况下,BOTDA系统可由以下三波耦合方程组描述为

$$\begin{cases} \frac{\partial E_P}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_P}{\partial t} = ig_o \rho E_S - \frac{\alpha}{2} E_P \\ -\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_o \rho^* E_P - \frac{\alpha}{2} E_S, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma \rho = ig_a E_P E_S^* \end{cases} \quad (3)$$

式中 E_P 为抽运光的电场强度; c 为真空中的光速; g_o 为光波的耦合系数; ρ 为光纤纤芯的材料密度; E_S 为探测光的电场强度; Γ 为声波场的衰减率; g_a 为声波的耦合系数。探测光不仅经历了布里渊增益,还经历了布里渊相移^[32],具体公式为

$$g_{SBS}(\nu_S, z) = g_p \frac{\Delta\nu_B^2}{4\Delta\nu^2 + \Delta\nu_B^2} \otimes P_P(\nu_P, z), \quad (4)$$

$$\varphi_{SBS}(\nu_S, z) = g_p \frac{2\Delta\nu_B \Delta\nu}{4\Delta\nu^2 + \Delta\nu_B^2} \otimes P_P(\nu_P, z), \quad (5)$$

式中 g_p 为布里渊增益中心因子; $\Delta\nu = \nu_P - (\nu_S + \Delta\nu_B)$ 为探测光的频率失谐量; \otimes 为卷积运算; $P_P(\nu_P, z)$ 为抽运脉冲光的功率谱。实际测量的BGS和BPSS是由其本征谱与抽运脉冲光的功率谱卷积所得。

2.3 动态分布式应变测量的限制因素

由于传统的BOTDA系统的分布式应变或温度的测量时间通常需要数秒到数分钟,因此该系统适合于静态或缓慢的应变测量,应变的最大振动采样率为

$$f_{sa} = \frac{1}{\left(\frac{2nL}{c} + T_{switch}\right) N_{avg} \cdot N_f}. \quad (6)$$

由(6)式可知,影响测量时间的限制因素^[35]主要有以下4个方面。

1)FUT的长度 L :当探测光扫频时,为了避免布里渊信号的重叠问题,抽运脉冲光的重复频率应小于 $c/(2nL)$ 。

2)平均次数 N_{avg} :为了增强布里渊信号的

SNR,提高测量精度,如果FUT是保偏光纤,则平均次数仅需要数十次;如果FUT是普通单模光纤,需要增加扰偏器来消除偏振噪声的影响,则平均次数需要高达数千次,这极大地限制了测量时间。

3)有限的光波频率切换时间 T_{switch} :在使用扫频法测量分布式BGS时,由于光波频率的切换时间通常是由电学调制信号的频率切换时间决定的,因此微波源输出的微波信号的切换时间通常为毫秒数量级甚至更长,这极大地延迟了采集时间。

4)扫频个数 N_f :为了测量完整的BGS或大的应变/温度范围,需要扩大扫频范围 f_{span} 。同时,如果要获得更精确的BGS曲线,则需要更小的扫频间隔 Δf_{step} 。则光波的扫频个数为

$$N_f = f_{span} / \Delta f_{step}. \quad (7)$$

限制因素1是固有限制,决定了BOTDA系统的动态测量极限值,目前还没有突破的方案。限制因素2是普遍的限制因素,也可以通过增加抽运光功率和探测光功率以增加SNR,降低对平均次数的要求;另外,对于单模光纤,可以通过两束正交偏振的探测光合成的布里渊信号来消除偏振噪声,从而降低平均次数。限制因素3中的光波频率切换时间主要受限于电学微波源或者任意波形发生器(AWG)的性能,最近有报道指出基于高性能AWG的捷变频技术(FAT)可以有效地压缩光波频率切换时间。对于限制因素4,较多的扫频个数会增加采集的BGS的精度或增大应变变化范围,但是会限制采集时间,最近有报道指出利用斜坡法可以增大频率间隔,有效地减少扫频个数。

3 用于动态应变测量的快速BOTDA的分类

到目前为止,为了提升BOTDA系统的动态分布式传感性能,研究人员提出很多改进方案:偏振补偿技术、光学捷变频技术、斜坡法、光学啁啾链技术、光学频率梳技术等,相对应的动态传感系统分别介绍如下。

3.1 基于偏振补偿技术的快速BOTDA系统

由于SBS效应对抽运光和探测光的偏振态十分敏感,因此使得BOTDA系统中会产生偏振噪声。对于普通的单模光纤,通常需要使用扰偏器和数千次平均来减小系统的偏振噪声,这极大地增加了测量时间,限制了应变振动的采样率。针对限制因素2,2014年,López-Gil等^[36-37]提出一种利用平衡探测技术^[38]和正交的双边带(DSB)探测光(斯托

克斯-反斯托克斯光)来消除偏振噪声的技术方案。基于平衡探测和偏振消除的 BOTDA 系统的实验装置如图 2 所示,上支路产生脉宽较窄的高功率抽运脉冲光;下支路激光通过微波调制产生一阶上边带(USB)探测光和一阶下边带(LSB)探测光,分别作为斯托克斯光和反斯托克斯光,二者分别经过普通反射镜和法拉第反射镜,使二者偏振态正交。最后,布里渊信号经过波分器(WDM)和平衡探测技术获得。基于平衡探测和偏振消除的 BOTDA 系

统的实验结果如图 3 所示。在图 3(a)中,蓝色线为单个探测器获得的增益型布里渊信号(对于斯托克斯探测光);红色线为单个探测器获得的衰减型布里渊信号(对于反斯托克斯探测光);绿色线为平衡探测器获得的布里渊信号。图 3(b)为 25 km 处三种信号的局部放大图。由于平衡探测器所得布里渊信号可以看作两个偏振态布里渊信号合成的信号,因此可以有效地消除偏振噪声,降低平均次数。

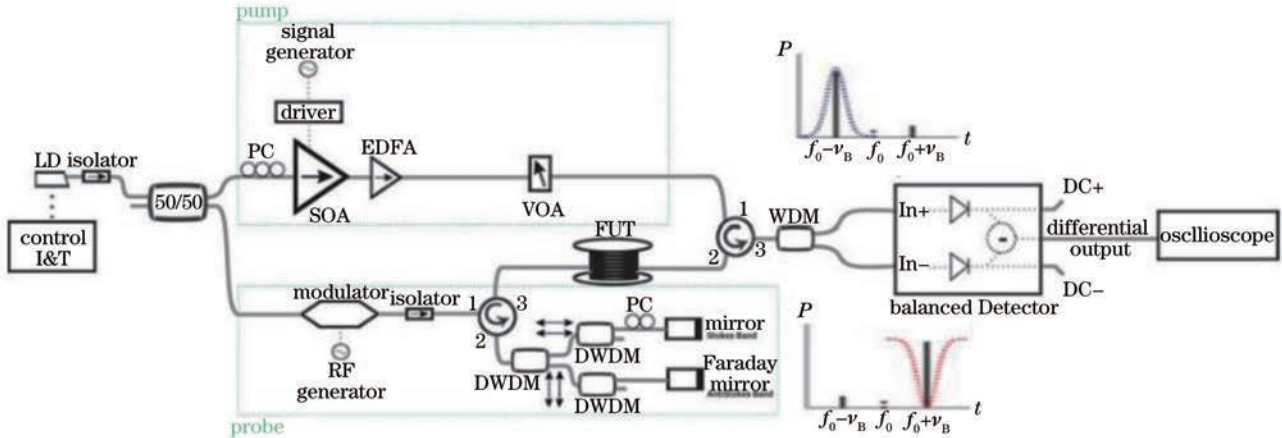


图 2 基于平衡探测和偏振消除的 BOTDA 系统的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of BOTDA system with balanced detection and polarization noise elimination

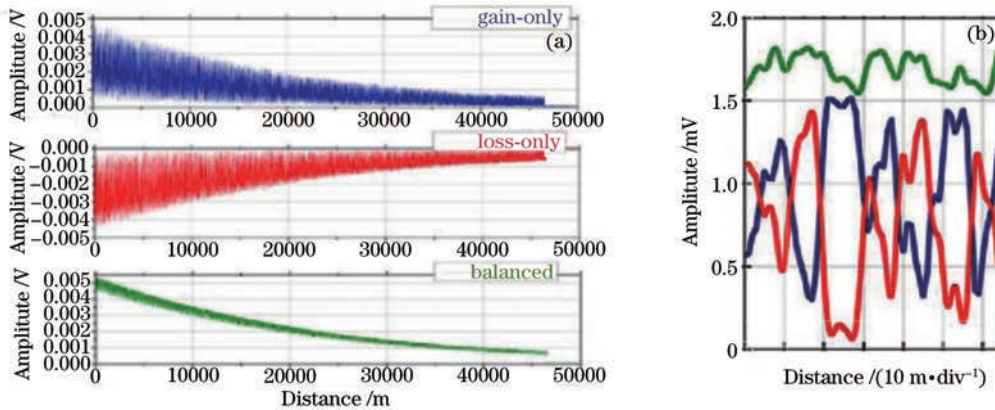


图 3 基于平衡探测和偏振消除的 BOTDA 系统的实验结果。(a)单探测器获得的布里渊增益信号(蓝色)、单探测器获得的布里渊衰减信号(红色)、平衡探测器获得的合成布里渊信号(绿色);(b) 25 km 处三种信号的局部放大图

Fig. 3 Experimental results of BOTDA system with balanced detection and polarization noise elimination.

(a) Brillouin gain trace obtained using single-detector (blue), Brillouin attenuation trace obtained using single-detector (red), and synthetic Brillouin trace obtained using balanced-detector (green); (b) local large diagram of the three traces around 25 km

随后,如图 4 所示,Urricelqui 等^[39]采用双偏振正交抽运脉冲光消除偏振噪声,而探测光为经过相位调制后的一阶 USB 和一阶 LSB。最终,在验证性实验中,对于 930 m 的 FUT,获得了 1 m 的空间分辨率和 651 Hz 的应变振动采样率。

3.2 基于光学捷变频技术的快速 BOTDA 系统

针对限制因素 3,2012 年 Peled 等^[40]在传统

BOTDA 系统的基础上,提出了基于光学 FAT 的快速 BOTDA 系统,采用高性能的电学数字式 AWG,实现了光波频率的快速切换。首先,将 100 个扫频光波段所对应的电信号波形以首尾串联的形式提前写入 AWG 的内存中,通常电信号频率在 FUTBFS (约为 11 GHz)附近。然后,内存中的波形转化为电信号输出,同时驱动调制器加载到单频率光波,在最

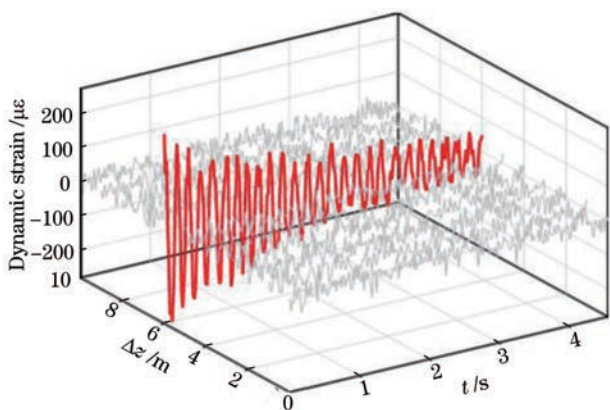


图 4 基于偏振补偿的应变快速采集测量实验结果

Fig. 4 Experimental results of fast-acquisition measurement of the strain based on polarization compensation

小工作点状态,形成一阶 USB 和一阶 LSB。最后,通过滤出一阶 USB 或一阶 LSB,即可获得 100 个首尾串联的扫频光波段。这样,由于 AWG 输出电学信号的频率转换时间小于纳秒数量级,因此对应的光波频率切换时间也小于纳秒数量级。与其他因素相比,光波频率切换时间 T_{switch} 可以忽略。

基于 FAT 的快速 BOTDA 系统原理示意图如图 5 所示,具体方案有两种:如图 5(a)所示,探测光由 100 个扫频光波段串联而成,每个光波段最短为 $2nL/c$,只受限于光纤长度,抽运光为脉冲光,脉冲周期等于光波时间段长度,这样每个频率的光波段都对应一个抽运脉冲光;如图 5(b)所示,由 100 个串联的扫频光波段经过强度调制,调制为脉冲光作为抽运光,这样每个脉冲光都对应一个扫频频率,而探测光是单频率的连续光。当传感光纤为 100 m 在 10 次平均的情况下,应变的振动采样率可以达到 10 kHz。

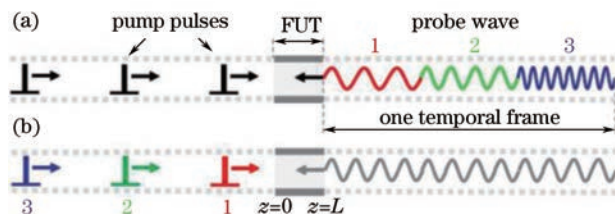


图 5 基于 FAT 的快速 BOTDA 系统原理示意图。

(a) 探测光经过 FAT 调制; (b) 抽运脉冲光经过 FAT 调制

Fig. 5 Schematic of fast BOTDA system based on FAT.

(a) Probe wave modulated by FAT;

(b) pump pulse modulated by FAT

为了降低对 AWG 高带宽 (>10 GHz) 和高空间分辨率的实际应用需求,2014 年,本课题组^[12]结合差分双脉冲技术^[13, 41]和二阶边带调制技术,实现

了高空间分辨率的快速 BOTDA 系统。如图 6 所示,在产生扫频光波段时,该方案的强度调制器工作在最大工作点,从而产生二阶 USB 和二阶 LSB,其中二阶 LSB 被滤出作为探测光。因此,该方案对 AWG 带宽的要求降低一半,大约在 5.5 GHz。

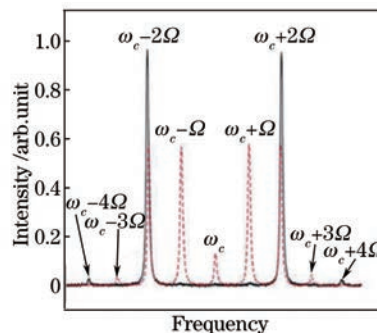


图 6 二阶边带调制

Fig. 6 Second-order sideband modulation

随后,二阶 LSB 探测光波经过 FAT 技术调制为扫频光波段。抽运光调制为 52 ns 与 50 ns 的脉冲对,对应 200 mm 的高空间分辨率。然而由于每个光波段持续时间最短为 2 倍 $2nL/c$,因此最高的应变振动采样率也减半。如图 7 所示,在 50 m 保偏光纤 (PMF) 和 2 kHz 的应变振动采样率的情况下,实现了对 33.3 Hz 和 50 Hz 振动信号的测量。图 7(a)为测量所得光纤振动截面 BGS 随时间的演进图;图 7(b)为应变的振动波形,在 5 次平均的情况下,BFS 可以通过 BGS 的曲线拟合获得,其标准误差为 0.7 MHz(对应应变测量的标准误差为 $14 \mu\epsilon$);图 7(c)为应变的振动波形功率谱。

为了进一步降低对 AWG 带宽的要求,本课题组又提出了基于双调制方案的捷变频技术^[42]。如图 8 所示,对于抽运光支路,固定频率在 10 GHz 左右的正弦微波信号驱动电光调制器 (EOM) 加载到光载波上,产生可以利用的一阶 USB 和一阶 LSB,通过光纤光栅 (FBG) 滤波后保留一阶 USB,再经过强度调制,调制为脉冲光作为抽运光。对于探测光支路,使用了单边带调制器 (SSBM),AWG 输出数百兆赫兹数量级的 FAT 信号,产生一阶 LSB 作为探测光。最终,AWG 只需要数百兆赫兹数量级的带宽,就可以使抽运光和探测光的频率差覆盖光纤的 BFS。

3.3 基于斜坡法的快速 BOTDA 系统

针对限制因素 4,2009 年, Bernini 等^[43]利用 BGS 的单侧斜坡,搭建了斜坡辅助 BOTDA (SA-BOTDA) 系统,其原理如图 9 所示。如图 9(a)所

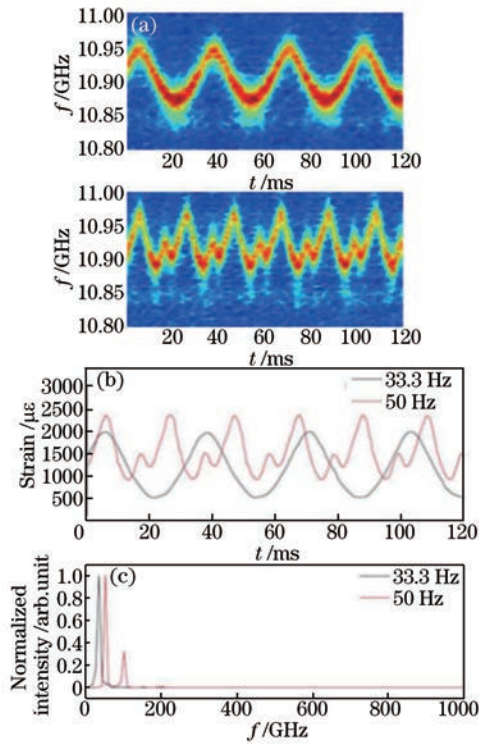


图 7 振动信号的测量。(a)测量所得光纤振动截面 BGS 随时间的演进图；(b)应变的振动波形；(c)应变的振动波形功率谱
Fig. 7 Measurements of the vibration signals. (a) Evolution of the measured BGS of the vibrated section of fiber; (b) vibration waveforms of the strain; (c) power spectra of the vibration waveforms of the strain

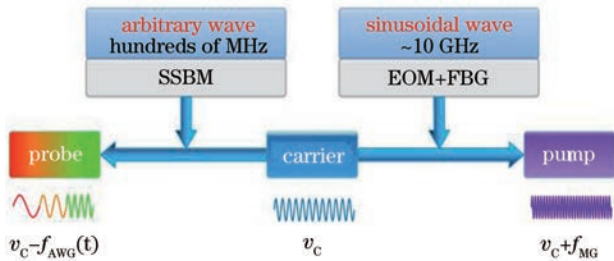


图 8 基于双调制方案的捷变频技术示意图
Fig. 8 Schematic of the frequency-agile technique based on dual-modulation scheme

示,该技术将 BGS 的一侧斜坡简单地近似为线性段,根据预先测量的 BGS 单侧斜坡数据可以拟合出线性函数。然后,抽运光与探测光的频率差设定在 BGS 的斜坡中心位置。如果光纤某位置的应变发生改变,则该位置的整个 BGS 会随之改变,这样布里渊信号的强度大小会随着光纤的 BFS(应变)的变化而变化,将采集到的布里渊信号强度代入线性函数,即可解调出对应的应变值。如图 9(b)所示,在应变振动采样率为 200 Hz 情况下,采用斜坡法采集到了 12.3 Hz 振动频率下的应变波形(蓝色线),和

传统的曲线拟合法所得应变波形(红色线)相符合,但存在距离 0 $\mu\epsilon$ 位置越远的地方,应变波形失真越大的问题。图 9(c)所示为振动频率分别为 12.3, 26.6, 84.5 和 98 Hz 下谱域中的动态应变,该系统实现了最大为 98 Hz 的应变振动信号的动态测量。

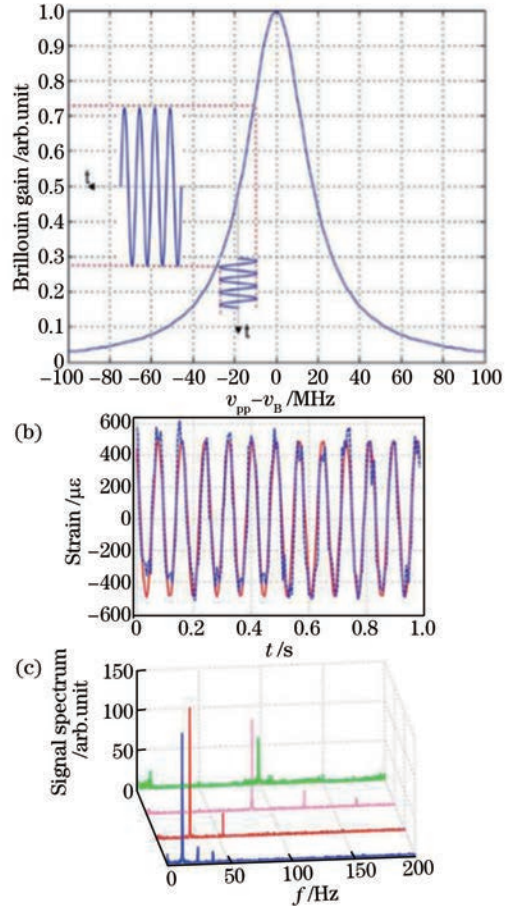


图 9 SA-BOTDA 系统原理示意图。(a)斜坡法操作原理；(b)斜坡法和曲线拟合法应变振动波形测量的比较；(c)不同振动频率下谱域中的动态应变
Fig. 9 Schematic of SA-BOTDA system. (a) Operation principle of slope-assisted method; (b) comparison of strain vibration waveforms measured by slope-assisted method and curve fitting method; (c) dynamic strain in the spectral domain for different vibration frequencies

对于 SA-BOTDA 系统而言,其振动采样率只受限于光纤长度和平均次数,而且扫频个数 $N_f = 1$,但是仍存在应变动态范围较小的问题,对应的态频率范围小于 BGS 的线宽(≈ 30 MHz)。考虑到对于大应变动态范围的测量需求,目前主要有两个研究方向:一是增加斜坡数量;二是扩大斜坡的单调范围。

3.3.1 增加斜坡数量
2011 年,Peled 等^[44]针对光纤的 BFS 分布不均匀问题,提出了一种任意 BFS 分布的 SA-BOTDA

系统。首先,用传统的 BOTDA 系统测量静态时分布式的 BGS,通过曲线拟合获得分布式的 BFS;然后,根据 BFS 的分布情况,通过 AWG 对探测光的频率随时间进行调制;最后,通过同步抽运光与探测光,使得二者频率差值始终位于 BGS 峰值的 3 dB 位置。这样光纤中每个位置都可以进行基于斜坡法的分布式的应变动态测量。实验中采集到了高达 400 Hz 的振动信号。随后,采用 BGS 双斜坡进行了 BOTDA 系统的动态测量。定义 R_B 为分别位于 BGS 两侧的数据点(探测光功率值)的比值,该比值不受抽运光功率的波动影响。

2016 年,本课题组利用双斜坡解调算法和捷变频技术相结合的技术方案,实现了多斜坡 F-BOTDA 系统^[3],其原理如图 10 所示。在图 10(a)中,探测光包含两个光谱线(Tone1 和 Tone2),频率差为 $\Delta\nu_T$,BFS 可以通过两个光谱线增益的比值获得,然而应变的测量范围会受到斜坡宽度的限制。在图 10(b)中,探测光由双光谱线扩展到多条等频率间隔的光谱线,由于远离 BFS 的光谱线增益逐渐减弱,因此通过对比各光谱线增益的大小,即可提取相邻且增益最大的两个光谱线来解调 BFS。多条光谱线对应的多个扫频光波时间段可由 2.3 节中介绍的捷变频技术产生。根据奈奎斯特采样定律,该方法的

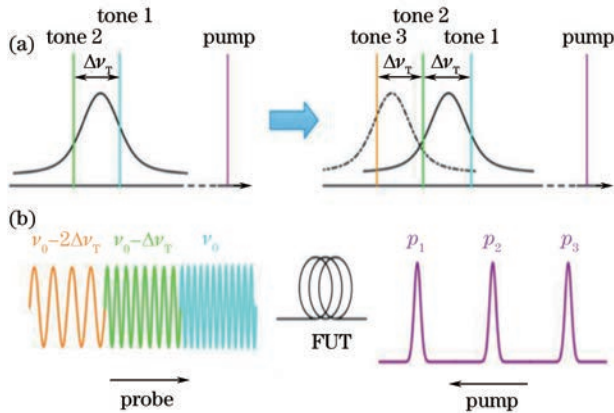


图 10 多斜坡 F-BOTDA 系统原理示意图。(a)多斜坡 F-BOTDA 的抽运光和探测光的频域关系,以及测量范围扩展的基本思路;(b)多斜坡 F-BOTDA 的抽运光和探测光的时域关系

Fig. 10 Schematic of multi-slope-assisted F-BOTDA system. (a) Frequency-domain relationship of pump and probe waves of multi-slope-assisted F-BOTDA, and basic idea of the extension of measurement range; (b) time-domain relationship of pump and probe waves of multi-slope-assisted F-BOTDA

$$f_{\max} = \frac{c}{4nL \left(\frac{\Delta\nu_{B,\max}}{\Delta\nu_T} + 1 \right) N_{\text{avg}}} \quad (8)$$

由(8)式可知, f_{\max} 受限于光纤长度、平均次数和扫频个数(光谱线个数)。

基于多斜坡 F-BOTDA 所得 BFS 应变振动波形的实验测量结果如图 11 所示。在图 11 中,红色虚线对应传统曲线拟合法获得 BFS 随时间变化的应变振动波形,而蓝色实线对应多斜坡法解调出的 BFS 随时间变化的应变振动波形,4 幅分图对应不同的扫频间隔(频率差) $\Delta\nu_T$, 分别为 20, 40, 60 和 80 MHz。如图 11(b) 所示,当扫频间隔 $\Delta\nu_T = 40$ MHz 时,多斜坡法解调出的应变振动波形与传统曲线拟合法所得应变振动波形符合得最好。如图 11(d) 所示,当扫频间隔 $\Delta\nu_T = 80$ MHz 时,应变振动波形局部有轻微的失真。虽然由于电机的限制,实验中对 32 m 的光纤只采集到了 1 m 空间分辨率和 12.8 Hz 的振动信号,但是采样率为 1 kHz,动态应变的改变量可以达到 5000 $\mu\epsilon$,对应 BFS 的改变量为 241 MHz,这远远大于 BGS 两个斜坡的可利用频率范围。

3.3.2 扩大斜坡的单调范围

2012 年,Urricelqui 等^[45]首次提出利用 BPSS 和射频(RF)解调算法实现动态布里渊光纤传感的技术方案。2014 年,Tu 等^[46]通过外差探测方法和同相正交(IQ)解调算法获得了分布式的 BGS 和 BPSS,搭建了矢量 BOTDA 系统,并对比了二者在单斜坡 BOTDA 系统中的动态应变传感。2016 年,本课题组根据矢量 SBS,提出一种具有大频率范围的单调斜坡的 K 系数谱,并结合 FAT 实现了新的斜坡法 BOTDA 系统^[32]。对于单斜坡 BOTDA 系统,无论是利用 BGS 单斜坡,还是利用 BPSS 斜坡,可利用的频率范围都小于 BGS 的线宽。为了充分利用 BGS 的频率范围,定义一个无量纲的系数为

$$K(\nu_s, z) = \frac{\varphi_{\text{SBS}}(\nu_s, z)}{g_{\text{SBS}}(\nu_s, z)} \quad (9)$$

当抽运光为矩形脉冲光时,存在关系式为

$$P_p(\nu_p, z) = P_0 \left[\frac{\sin \pi(\nu_p - \nu_0)\tau_p}{\pi(\nu_p - \nu_0)} \right]^2 \quad (10)$$

式中 P_0 为脉冲光峰值功率; τ_p 为脉宽。

由(4)式、(5)式、(9)式和(10)式可知, K 系数是关于矢谐量的函数。根据卷积函数的特性, P_0 项被消除了,也就是说, K 系数谱(KS)对抽运光功率的波动是免疫的,则 SNR 能够得到提升。

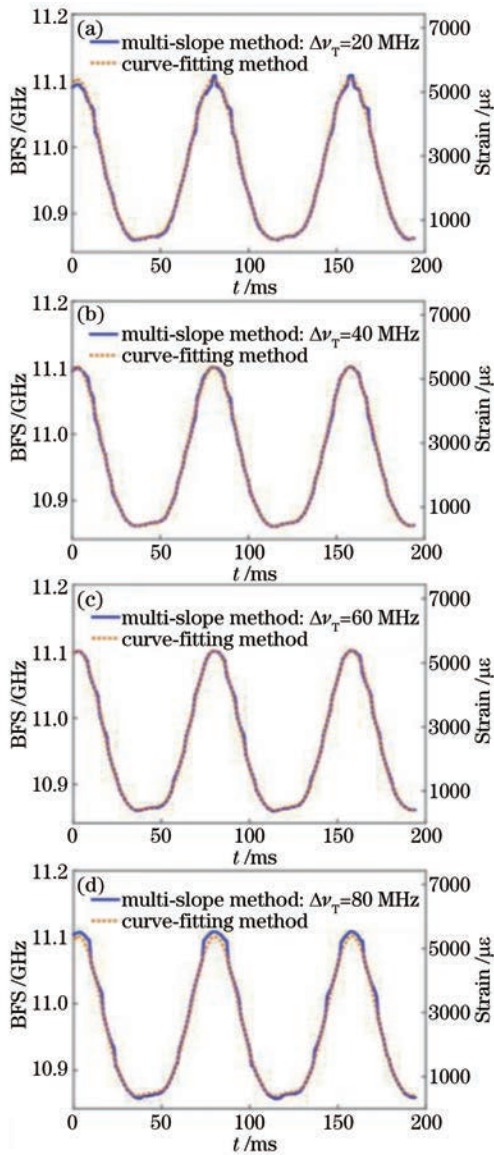


图 11 多斜坡法(蓝色实线)和传统曲线拟合法(红色虚线)所得 BFS 应变振动波形的实验测量结果,分别对应不同的扫描间隔。(a) 20 MHz; (b) 40 MHz; (c) 60 MHz; (d) 80 MHz

Fig. 11 Experimental measurement results of BFS strain vibration waveforms obtained via multi-slope-assisted method (blue solid curve) and traditional curve-fitting method (red dotted curve) in various frequency-intervals.

(a) 20, (b) 40, (c) 60, and (d) 80 MHz

当抽运光为连续光时,(9)式可以简化为

$$K(\nu_s, z) = \frac{2\Delta\nu}{\Delta\nu_B}. \quad (11)$$

此时,KS 是一条直线,斜率为 $2/\Delta\nu_B$ 。

图 12 为 $\Delta\nu_B = 30$ MHz 时的仿真图。归一化的 BGS 如图 12(a)所示,其中布里渊增益为 $g_{SBS}(\nu_s, z)/\max[g_{SBS}(\nu_s, z)]$;归一化的 BPSS 如图 12(a)所示,其中布里渊相移为 $\varphi_{SBS}(\nu_s, z)/\max[\varphi_{SBS}(\nu_s, z)]$;

归一化的 KS 如图 12(c)所示,由(9)式可知,其中 K 系数为 $\varphi_{SBS}(\nu_s, z)/g_{SBS}(\nu_s, z)$ 。随着抽运脉冲光脉宽减小,BGS 和 BPSS 逐渐展宽,KS 降低。当抽运脉冲光脉宽大于 50 ns 时,在 ± 100 MHz 的频率范围内,KS 可以认为是一条直线。值得注意的是,KS 是单调的,而且是关于零点对称的, $K=0$ 的频率点对应于光纤的 BFS,若以 KS 作为传感曲线函数,则只需要一个 K 值即可解调出 BFS。这样 KS 可以充分利用 SBS 效应的频率范围,从而获得更大的应变振动的动态测量范围。

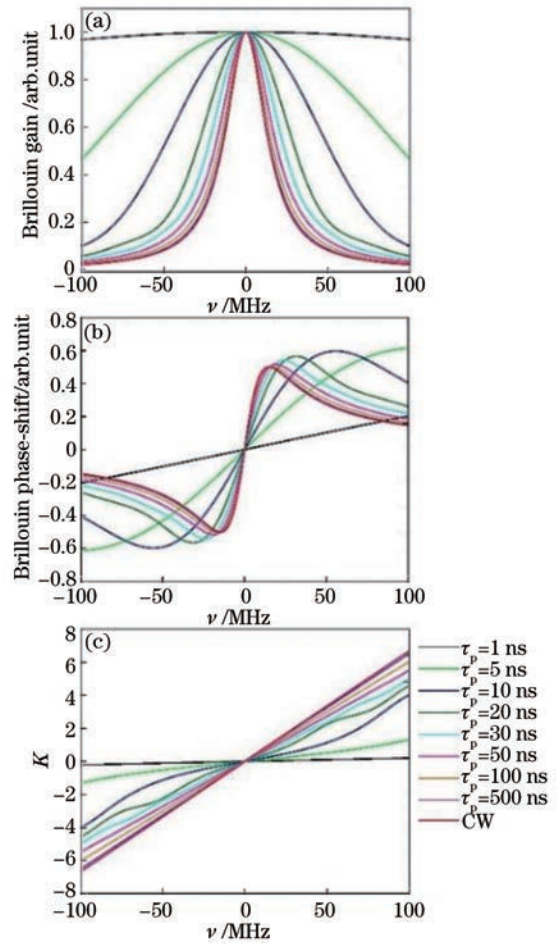


图 12 $\Delta\nu_B = 30$ MHz 时的归一化谱仿真图,抽运脉冲光脉宽从 1 ns 到连续光。

(a)归一化的 BGS; (b)归一化的 BPSS; (c)归一化的 KS

Fig. 12 Simulation diagram of normalized spectra with the pump pulse width from 1 ns to continuous wave ($\Delta\nu_B = 30$ MHz).

(a) normalized BGS;

(b) normalized BPSS; (c) normalized KS

基于 KS 的多斜坡 BOTDA 系统示意图如图 13 所示。左侧的连续光包含探测光和参考光,它们的频率差设置为 880 MHz。右侧为抽运光,利用 FAT 产生扫频光波段并调制成脉冲光,最终产生一系列

的等时间间隔和等频率间隔的脉冲光串。两束光以相对方向注入待测的保偏光纤，输出的探测光和参考光的拍频信号被一个高速高带宽的探测器接收，经过光电转换后，电信号被示波器和电脑采集。然后，拍频信号的电信号再经过 IQ 解调算法处理，即可获得分布式的布里渊增益和布里渊相移，然后通

过公式计算出 K 值。在光纤某位置，一个扫频的抽运脉冲光会对应一个 K 值。在实际操作中，首先，需要将扫频间隔设置为 4 MHz，获得 KS，并经过多项式拟合获得 KS 拟合曲线。然后，增大扫频间隔，通过比较各个频率对应 K 值的大小，找到最接近 0 的 K 值。最后，代入 KS 拟合曲线解调即可。

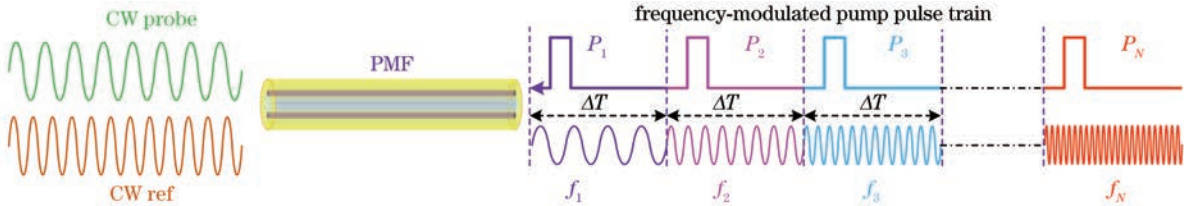


图 13 多频率方案抽运光和探测光的时域关系

Fig. 13 Time-domain relationship of pump wave and probe wave for multi-slope-assisted method

BFS 应变振动波形的实验测量结果如图 14 所示。在图 14 中，黑色散点曲线为基于 BGS 曲线拟合所得到的 BFS 应变振动波形，蓝色散点曲线为基于 KS 曲线拟合所得到的 BFS 应变振动波形，二者均可以作为 BFS 应变振动波形的参考波形。图 14 的 4 幅分图中的红色曲线分别对应频率间隔为 80, 120, 160 和 180 MHz 时多斜坡法解调出的 BFS 应变振动波形。如图 14(a) 和图 14(b) 所示，当频率间隔为 80 MHz 和 120 MHz 时，解调出的 BFS 应变振动波形和传统曲线拟合所得到的参考波形符合得最好。如图 14(c) 所示，当频率间隔为 160 MHz 时，BFS 应变振动波形局部有轻微的失真；如图 14(d) 所示，当频率间隔为 180 MHz 时，BFS 应变振动波形局部有严重的跳变点。由此可知，最大频率间隔应为 160 MHz，是传统的基于 BGS 的多斜坡 BOTDA 系统的 2 倍，也就是说，在相同的扫频范围内，扫频个数减半，最大应变振动采样率增加为原来的 2 倍。在实验中，对于一个 50 m 的保偏光纤，采集到了主频为 5.58 Hz 和二次谐波为 11.14 Hz 的振动信号。如果扫频光波段长度设置为 500 ns，则最大应变振动采样率可达到 0.33 MHz，动态应变的改变量可达到 5372.9 $\mu\epsilon$ ，对应的 BFS 改变量可达到 254.3 MHz。整体而言，KS 对抽运脉冲光功率的波动不敏感，SNR 高，且单调段的频率范围宽，基于 KS 的多斜坡 BOTDA 系统很好地平衡了大应变测量范围和高应变振动采样率之间的关系。

3.4 基于光学啁啾链技术的快速 BOTDA 系统

在传统的 FAT 方案中，只有扫频光波段和对应的抽运脉冲光相互作用后才能获得分布式的

BGS，无法实现由单发抽运脉冲光获得分布式的 BGS。最近，本课题组提出了一种基于光学啁啾链 (OCC) 的单发测量的动态布里渊光纤传感技术方案^[47]。OCC-BOTDA 系统原理示意图如图 15 所示。在图 15 中，抽运光为单发抽运脉冲光，探测光利用 FAT 产生光学啁啾脉冲段，扫频范围从 ν_1 到 ν_N ，时间长度为 Δt 。然后，多个光学啁啾脉冲段首尾串联而成 OCC 作为探测光，时间长度 $t = 2nL/c$ 。当单发抽运脉冲光和 OCC 探测光注入 FUT，每个光学啁啾脉冲段内就会产生一个 BGS。则应变振动采样率为

$$f_{\text{Sa}} = 1/(N_{\text{avg}} \cdot t). \quad (11)$$

由(11)式可知，该技术方案的应变振动采样率只受限于光纤长度和平均次数。

OCC-BOTDA 系统对 BGS 的测量如图 16 所示。对于 50 m 保偏光纤的分布式的 BGS 的测量，由于两个相邻的光学啁啾脉冲段从高频过渡到低频时，会产生一个等于 BFS 的等效频率，因此就会产生一个假的 BGS。另外，声场建立和消失的过程必然导致光学啁啾脉冲段内的 BGS 的不规则。然而由图 16(b) 可知，随着应变的增加，BGS 向右侧移动，可以通过互相关算法获得 BFS 的改变量，以及对应的应变的改变量。

OCC-BOTDA 系统对机械撞击的实验测量结果如图 17 所示。在对 10 m 光纤中 2 m 位置受到机械撞击的实验测量中，扫频范围为 400 MHz，未加平均，OCC 长度为 400 ns，对应应变振动采样率为 2.5 MHz。如图 17(a) 所示，经过互相关算法处理后的 BGS 关于频率域中心对称，随着时间的改变，整个增益谱发生了频移。如图 17(b) 所示，通过

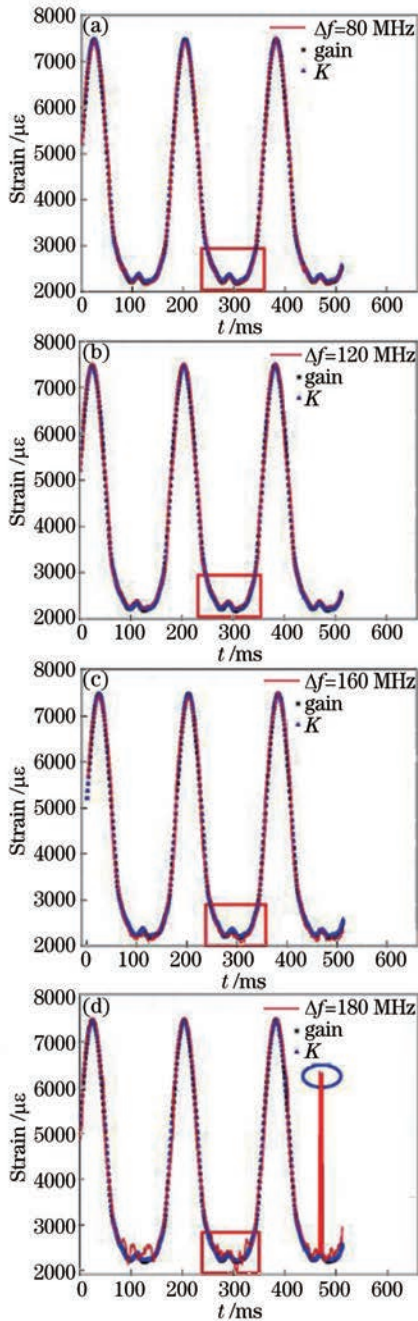


图 14 BFS 应变振动波形的实验测量结果,其中两种参考波形分别为 BGS 曲线拟合所得参考波形(黑色散点)和 KS 曲线拟合所得参考波形(蓝色散点),多斜坡 F-BOTDA 系统解调所得应变振动波形(红色实线)分别对应不同的扫频间隔。(a) 80 MHz; (b) 120 MHz; (c) 160 MHz; (d) 180 MHz

Fig. 14 Experimental results of BFS strain vibration waveforms, in which two kinds of reference strain vibration waveforms are curve-fitted based on the BGS (black scatter) and KS (blue scatter) respectively, meanwhile the strain vibration waveforms (red solid curve) are demodulated via F-BOTDA system in various frequency-intervals.

(a) 80, (b) 120, (c) 160, and (d) 180 MHz

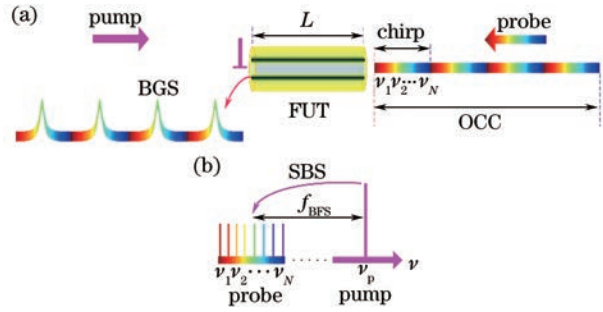


图 15 OCC-BOTDA 系统原理示意图。

(a) 时域关系; (b) 频域关系

Fig. 15 Schematic of OCC-BOTDA system.

(a) Time-domain relationship;

(b) frequency-domain relationship

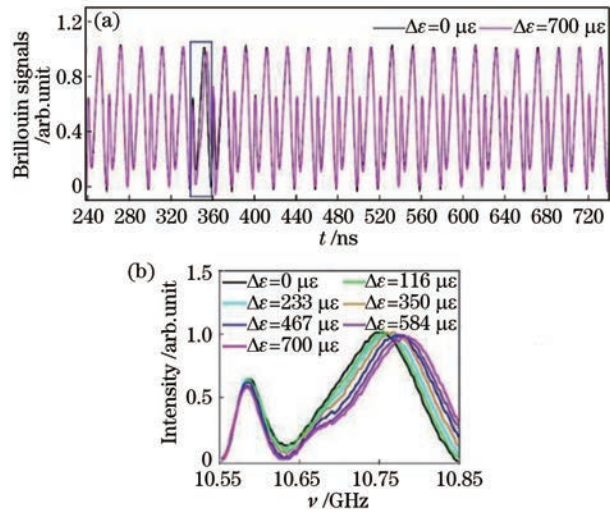


图 16 OCC-BOTDA 系统对 BGS 的测量。(a) 单发抽运脉冲即可测量分布式的 BGS; (b) 不同应变的改变量时的 BGS

Fig. 16 Measurement of BGS via OCC-BOTDA system.

(a) Distributed BGS measured by single shot of pump pulse wave; (b) various BGS for different strain changes

曲线拟合可以获得应变的改变量(绿色实线),与之对照的是 30 个点的移动平均的结果(红色实线)。应变曲线从未受应变区域过渡到高应变区域,大约持续了 250 μs。

为了显示 OCC-BOTDA 系统的快速采集特性,本课题组通过将相邻 OCC 的扫频频率差设置为 20 MHz 来模拟一个快速的应变过程。光纤长度为 10 m,应变振动采样率为 6.25 MHz。OCC-BOTDA 系统对快速开关事件的实验测量结果如图 18 所示。图 18(a)显示了平均 200 次的实验测量结果,可以看出相邻的 BGS 有明显的错位;图 18(b)显示了未加平均的实验测量结果;图 18(c)显示了解调出的 BFS 的改变量与时间的关系,可以看出在平均 200 次的实验测量结果中,相邻的 BFS 的改变

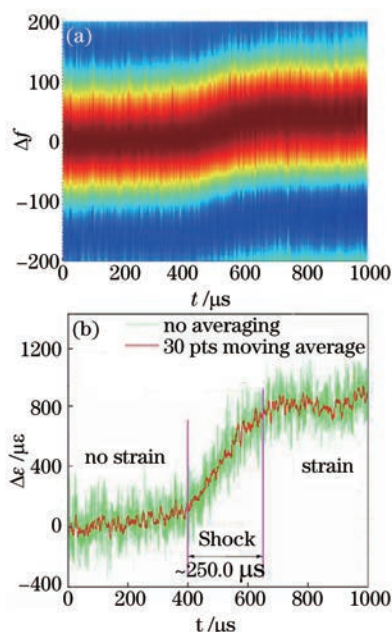


图 17 OCC-BOTDA 系统对机械撞击的实验测量结果。

- (a) 经过二次互相关算法处理后的 BGS 演进图；
- (b) 解调出的应变振动波形

Fig. 17 Experimental results of mechanical shocks via OCC-BOTDA system. (a) Evolution of BGS processed by twice correlation algorithm; (b) demodulated strain vibration waveforms

量相差 20 MHz 左右,而未加平均的实验测量结果的波动范围为 ± 2.5 MHz。

3.5 基于光学频率梳的动态布里渊光纤传感系统

针对限制因素 4,也可以在频域直接产生多条光谱线来实现单发测量,该系统称为自扫频 BOTDA 系统(SF-BOTDA)。SF-BOTDA 系统的演变与原理示意图如图 19 所示。如图 19(a)所示,2008 年,Chaube 等^[48]将抽运光调制为频率梳,并将探测光调制为脉冲光,通过 SBS 效应作用实现光纤中分布式应变的动态传感。如图 19(b)所示,2011 年,Voskoboinik 等^[49]将抽运光与探测光都调制为频率梳,但探测光频率梳间隔比抽运光频率梳间隔大 3 MHz,这样探测光就不需要扫频了。在应变振动采样率为 5.5 kHz 的情况下,获得了 400 Hz 的应变振动波形。另外,SF-BOTDA 系统的 BFS 动态范围可以扩大到吉赫兹数量级^[50]。

最近,Fang 等^[51]提出了一种基于新型的单发 BOTDA 快速测量系统技术方案。经过正交频分复用技术(OFDM)调制产生的探测光,用来采集分布式的 BGS,同时采用相干探测技术增强 SNR。该技术方案既不需要扫频,又不需要扰偏,更不需要平均。单发 BOTDA 系统原理示意图如图 20 所示,其

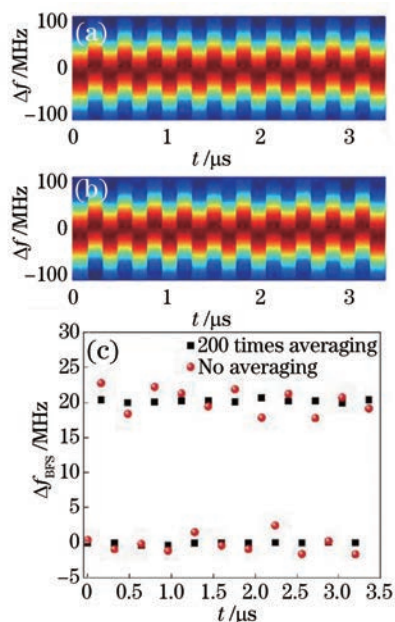


图 18 OCC-BOTDA 系统对快速开关事件的实验测量结果:

- 算法处理后的 BGS 演进图。(a) 平均 200 次;
- (b) 未加平均; (c) 解调出的 BFS 的改变量与时间的关系

Fig. 18 Experimental results of the switch event via OCC-BOTDA system: evolution of BGS processed by twice correlation algorithm for various conditions.

- (a) 200 times averaging; (b) no averaging;
- (c) demodulated BFS changes over time

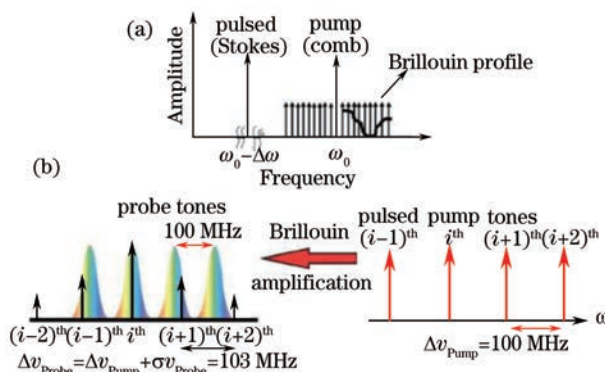


图 19 SF-BOTDA 系统的演变与原理示意图。(a) 基于光学频率梳的 BOTDA 系统;(b) SF-BOTDA 系统

Fig. 19 Schematic of SF-BOTDA system.

- (a) BOTDA system based on optical frequency comb;
- (b) SF-BOTDA system

中涉及到布里渊增益谱(BGS)和布里渊衰减谱(BLS)。由图 20(a)可看出,光波经过 OFDM 调制后,形成等频率间隔的载波频率梳;由图 20(b)可看出,为了消除偏振退化效应,经过射频(RF)正弦信号调制,产生正交偏振的一阶 USB 和一阶 LSB;由图 20(c)可看出,该双偏振双边带的 OFDM 探测光和抽运脉冲光相对注入 FUT,并对接收到的信号分

段进行快速傅里叶变换 (FFT) 和数字信号处理 (DSP), 可以获得分布式的 BGS; 由图 20 (d) 可看出, USB 是衰减谱而 LSB 是增益谱。

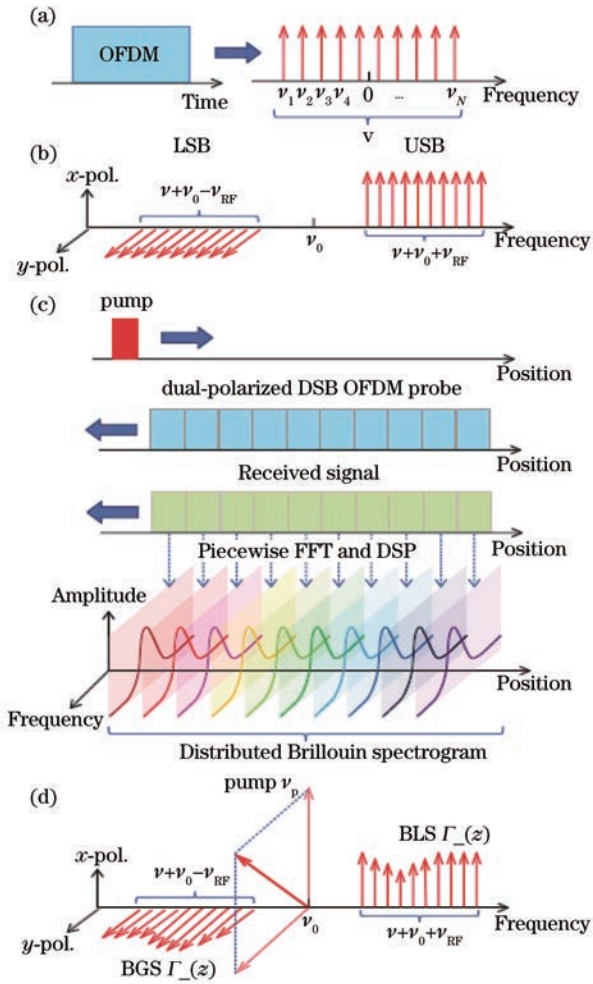


图 20 单发 BOTDA 系统原理示意图。(a) 频域中的 OFDM 信号的子载波; (b) 双偏振双边带 OFDM 探测光; (c) 抽运光和探测光的相互作用及布里渊谱型解调过程; (d) SBS 过程中, BGS 和 BLS 的示意图

Fig. 20 Schematic of single-shot BOTDA system.

- (a) Subcarriers of OFDM signal in frequency domain;
- (b) dual-polarized double-sideband OFDM probe;
- (c) pump and probe interaction and Brillouin spectrum extraction;
- (d) BGS and BLS after SBS process

图 21 为根据静态温度的测量实验结果重构的布里渊谱。图 21 (a) 显示了分布式的衰减谱; 图 21 (b) 显示了分布式的增益谱; 图 21 (c) 为二者合成的 BGS; 图 21 (d) 为 A、B、C 三点合成的 BGS。虽然该方法测量的是温度分布, 但同样适用于应变的分布式动态测量。该方法实现了抽运光单发的快速测量, 然而这是以牺牲空间分辨率 (20.48 m) 而实现的。

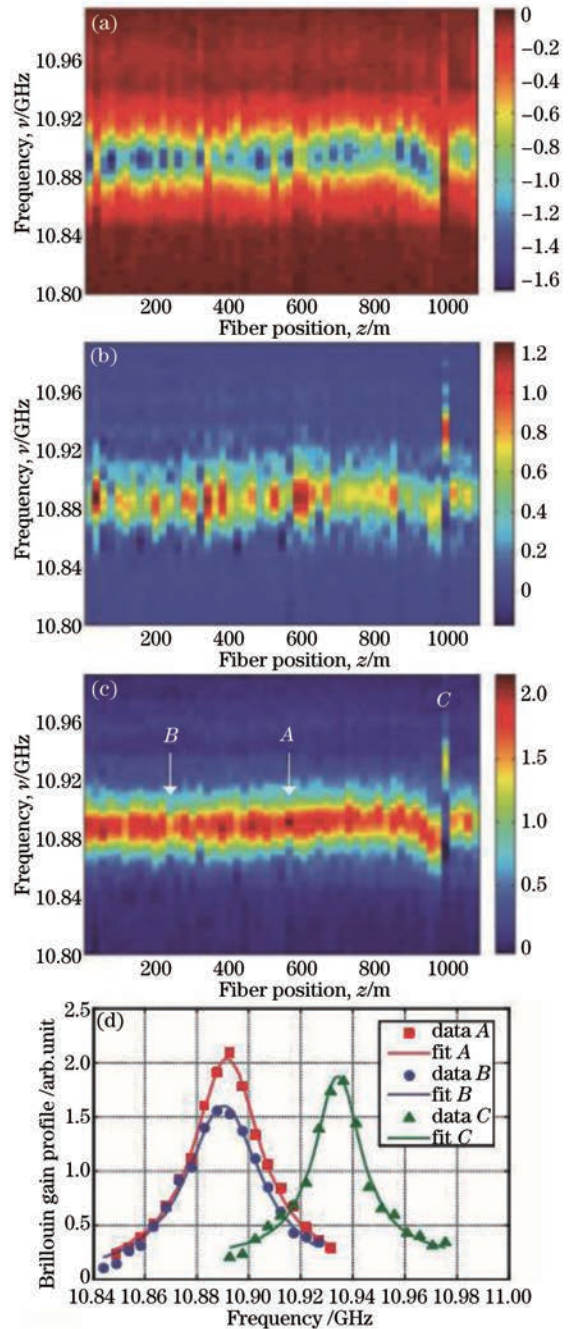


图 21 根据静态温度的测量实验结果重构的布里渊谱。(a) x 偏振态; (b) y 偏振态; (c) 双偏振相结合的情况; (d) 在 (c) 中 A、B、C 三点的测量数据及其洛伦兹拟合曲线
Fig. 21 Reconstructed Brillouin spectrograms based on the measurement experimental results of static temperature. (a) x -polarization; (b) y -polarization; (c) combined dual-polarization; (d) measured data and Lorentzian fitting curves of marker A, B, C in (c)

4 结 论

与传统的电学传感器相比, 光纤传感具有很突出的优势, 尤其是 BOTDA 系统。在现代工业中,

对动态分布式应变测量的需求在不断增强,然而传统的 BOTDA 系统受到光纤长度、平均次数、光波频率切换时间和扫频个数等因素的限制,测量时间需要数秒到数分钟,因此被认为只适合于静态或者缓慢变化应变的测量。

从 BOTDA 的原理出发,总结了近期利用 BOTDA 系统在快速分布式应变测量方面的研究进展。光纤既是传感器又是传光介质,光纤长度对应应变振动采样率的限制是固有的。对于传感光纤,使用保偏光纤时,SNR 较高,平均次数少,但价格昂贵,不适宜长距离传感;使用普通单模光纤时,偏振补偿技术可以取代扰偏器,有效地消除偏振噪声,并减少平均次数,但该方法需要分别测量两个偏振方向的布里渊信号,因而偏振态切换时间、频率切换时间和扫频个数同样限制应变振动采样率。对于光学 FAT,利用高性能的 AWG 产生捷变频信号,使得光波频率切换时间可以忽略不计,然而扫频个数仍然限制着应变振动采样率。对于单斜坡法,应变振动采样率只受限于光纤长度,然而应变动态范围受限于 BGS 的斜坡范围;对于多斜坡法,虽然增加了动态范围,但是应变振动采样率和斜坡个数成反比。值得注意的是,与 BGS 和 BPSS 两种传感曲线相比,KS 传感曲线呈现出更加优异的性能:更大的动态范围和免疫于抽运脉冲光的功率波动。对于 OCC 技术,应变振动采样率只受限于光纤长度,而且系统的空间分辨率和动态范围可以通过啁啾信号预编写来实现智能化(或个性化)配置。对于光学频率梳技术,虽然应变振动采样率也只受限于光纤长度,但是其空间分辨率受限于频率梳间隔和 FFT 的时间窗,这极大地限制了该方法的实际应用价值。随着限制因素的逐个突破,结合多个新技术搭建而成的快速 BOTDA 系统会具有更好的性能。例如,结合偏振补偿技术、KS 传感曲线和 OCC 在单模光纤的长距离快速应变测量中具有潜在的优势。另外,在保持快速应变测量的同时,如何有效地提高系统的空间分辨率也将会成为重要的研究方向。

综上所述,快速 BOTDA 系统受到国内外的广泛研究,多种改进方案的实用化在国防边境安全、现代工业控制、土木机构监测、灾害监测、航空航天器安全监测和海洋探测等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9(2): 57-79.
- [2] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [3] Ba D X, Wang B Z, Zhou D W, *et al.* Distributed measurement of dynamic strain based on multi-slope assisted fast BOTDA[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9781-9793.
- [4] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [5] Hotate K. Recent achievements in BOCDA/BOCDR [C]//*Proceedings of 2014 IEEE Sensors*, 2014: 142-145.
- [6] Boyd R W. *Nonlinear optics*[M]. 3rd ed. Pittsburgh: Academic Press, 2008: 429-471.
- [7] Zadok A, Antman Y, Primerov N, *et al.* Random-access distributed fiber sensing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): L1-L5.
- [8] Bao X Y, Webb D J, Jackson D A. 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(7): 552-554.
- [9] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, *et al.* 2cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [10] Xu P B, Dong Y K, Zhang J W, *et al.* Bend-insensitive distributed sensing in single-mode-multimode-singlemode optical fiber structure by using Brillouin optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22714-22722.
- [11] Dong Y K, Xu P B, Zhang H Y, *et al.* Characterization of evolution of mode coupling in a graded-index polymer optical fiber by using Brillouin optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26510-26516.
- [12] Dong Y K, Ba D X, Jiang T F, *et al.* High-spatial-resolution fast BOTDA for dynamic strain measurement based on differential double-pulse and second-order sideband of modulation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 2600407.
- [13] Li W H, Bao X Y, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [14] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis combining frequency-division multiplexing and in-line EDFAs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1161-1167.
- [15] Ma Z, Zhang M J, Liu Y, *et al.* Incoherent Brillouin

- optical time-domain reflectometry with random state correlated Brillouin spectrum[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-7.
- [16] Wang F, Zhan W W, Zhang X P, *et al.* Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3663-3667.
- [17] Li B, Luo L Q, Yu Y F, *et al.* Dynamic strain measurement using small gain stimulated Brillouin scattering in STFT-BOTDR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(9): 2718-2724.
- [18] Yamauchi T, Hotate K. Distributed and dynamic strain measurement by BOCDA with time-division pump-probe generation scheme[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2004: CWA57.
- [19] Preter E, Ba D X, London Y, *et al.* High-resolution Brillouin optical correlation domain analysis with no spectral scanning[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27253-27267.
- [20] Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 700-719.
- [21] Ong S S L, Hotate K. Dynamic strain measurement at 50 Hz using a Brillouin optical correlation domain analysis based on fiber optic sensor[C]. *5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2003: 7993564.
- [22] Hotate K, Tanaka M. Distributed fiber Brillouin strain sensing with 1-cm spatial resolution by correlation-based continuous-wave technique[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(2): 179-181.
- [23] Mizuno Y, Hayashi N, Fukuda H, *et al.* Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry [J]. *Light Science & Applications*, 2016, 5(12): e16184.
- [24] Lee H, Hayashi N, Mizuno Y, *et al.* Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-7.
- [25] Mizuno Y, Zou W W, He Z Y, *et al.* Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) [J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12148-12153.
- [26] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA: measurements and signal processing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 48-56.
- [27] Garus D, Krebber K, Schliep F, *et al.* Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1402-1404.
- [28] Minardo A, Bernini R, Ruiz-Lombera R, *et al.* Proposal of Brillouin optical frequency-domain reflectometry (BOFDR) [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29994-30001.
- [29] Xu P B, Dong Y K, Zhou D W, *et al.* 1200 °C high-temperature distributed optical fiber sensing using Brillouin optical time domain analysis [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5471-5478.
- [30] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 4th ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2007.
- [31] Dong Y K, Zhang H Y, Zhou D P, *et al.* Characterization of Brillouin gratings in optical fibers and their applications[M]. London: Intech Publisher, 2012: 115-136.
- [32] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, *et al.* Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 1889-1902.
- [33] Diakaridia S, Pan Y, Xu P B, *et al.* Detecting cm-scale hot spot over 24-km-long single-mode fiber by using differential pulse pair BOTDA based on double-peak spectrum[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17727-17736.
- [34] Bao X Y, Wan Y D, Zou L F, *et al.* Effect of optical phase on a distributed Brillouin sensor at centimeter spatial resolution[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 827-829.
- [35] Wang B Z. *Dynamic distributed Brillouin optical fiber sensing based on optical frequency-agile technology* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. 王本章. 基于光学捷变频的动态分布式布里渊光纤传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [36] López-Gil A, Domínguez-López A, Martín-López S, *et al.* Simple method for the elimination of polarization noise in BOTDA using balanced detection of orthogonally polarized Stokes and anti-Stokes probe sidebands[C]. *23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2014, 9157: 91573U.
- [37] López-Gil A, Domínguez-López A, Martín-López S, *et al.* Simple method for the elimination of polarization noise in BOTDA using balanced detection and orthogonal probe sidebands[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2605-2610.
- [38] Domínguez-López A, López-Gil A, Martín-López S, *et al.* Signal-to-noise ratio improvement in BOTDA using balanced detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 26(4): 338-341.
- [39] Urricelqui J, López-Fernandino F, Sagues M, *et al.* Polarization diversity for Brillouin distributed fiber sensors based on a double orthogonal pump[C]. *23rd*

- International Conference on Optical Fiber Sensors, 2014, 9157: 91576A.
- [40] Peled Y, Motil A, Tur M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8584-8591.
- [41] Dong Y K, Bao X Y, Li W H. Differential Brillouin gain for improving the temperature accuracy and spatial resolution in a long-distance distributed fiber sensor[J]. Applied Optics, 2009, 48(22): 4297-4301.
- [42] Ba D X, Zhou D W, Wang B Z, *et al.* Dynamic distributed Brillouin optical fiber sensing based on dual-modulation by combining single frequency modulation and frequency-agility modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-8.
- [43] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [44] Peled Y, Motil A, Yaron L, *et al.* Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 19845-19854.
- [45] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, *et al.* Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [46] Tu X B, Sun Q, Chen W, *et al.* Vector Brillouin optical time-domain analysis with heterodyne detection and IQ demodulation algorithm[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 1-8.
- [47] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, *et al.* Single-shot BOTDA based on optical chirp chain probe wave for distributed ultra-fast measurement [J]. Light: Science & Applications, 2017.
- [48] Chaube P, Colpitts B G, Jagannathan D, *et al.* Distributed fiber-optic sensor for dynamic strain measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1067-1072.
- [49] Voskoboinik A, Yilmaz O F, Willner A W, *et al.* Sweep-free distributed Brillouin time-domain analyzer (SF-BOTDA) [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B842-B847.
- [50] Voskoboinik A, Willner A E, Tur M. Extending the dynamic range of sweep-free Brillouin optical time-domain analyzer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 2978-2985.
- [51] Fang J, Xu P B, Dong Y K, *et al.* Single-shot distributed Brillouin optical time domain analyzer[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15188-15198.