

激光与光电子学进展

光时域布里渊分布式光纤动态应变传感
技术研究进展

韦若雪, 刘戈, 陆杭林, 邵来鹏, 唐剑, 胡君辉*

广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004

摘要 布里渊分布式光纤传感技术可以实现分布式、长距离、高精度的温度或应变传感,在大型基础设施安全监测方面具有广泛的应用前景。传统的布里渊光时域分析技术(BOTDA)和布里渊光时域反射技术(BOTDR)由于需要通过扫描测量布里渊增益谱进而获得布里渊频移,测量过程较为耗时,难以胜任动态应变的测量。针对这一问题,学者们提出了多种解决技术方案并取得了很好的研究成果。本文对光时域布里渊分布式光纤动态应变传感技术的研究进展进行了详细综述,包括斜坡辅助布里渊光时域分析技术(SA-BOTDA)和布里渊光时域反射技术(SA-BOTDR)、捷变频 BOTDA/R 技术、啁啾链 BOTDA/R 技术和光频梳 BOTDA 技术等。

关键词 分布式光纤传感; 布里渊散射; 动态应变; 布里渊光时域反射

中图分类号 O437.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232364

Advances of Optical Time Domain Brillouin Distributed Fiber Dynamic
Strain Sensing Technology

Wei Ruoxue, Liu Ge, Lu Hanglin, Shao Laipeng, Tang Jian, Hu Junhui*

School of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Brillouin distributed fiber sensing technology can realize distributed, long-distance, high precision temperature, or strain sensing and has a wide range of applications in large-scale infrastructure security monitoring. Traditional Brillouin optical time domain analysis and reflectometry (BOTDA/R) must measure Brillouin's gain spectrum by sweeping frequency to obtain Brillouin's frequency shift. The measurement process is time-consuming, and it is difficult to measure the dynamic strain. To solve this problem, researchers have proposed various technical schemes and made significant progress. This paper summarizes the recent progress of the time-domain Brillouin optical distributed fiber dynamic strain sensing system, including the BOTDA/R dynamic sensing system based on the slope-assisted method as well as the frequency-agile, optical chirp chain, and optical frequency comb techniques.

Key words distributed fiber sensing; Brillouin scattering; dynamic strain; Brillouin optical time domain reflectometry

1 引言

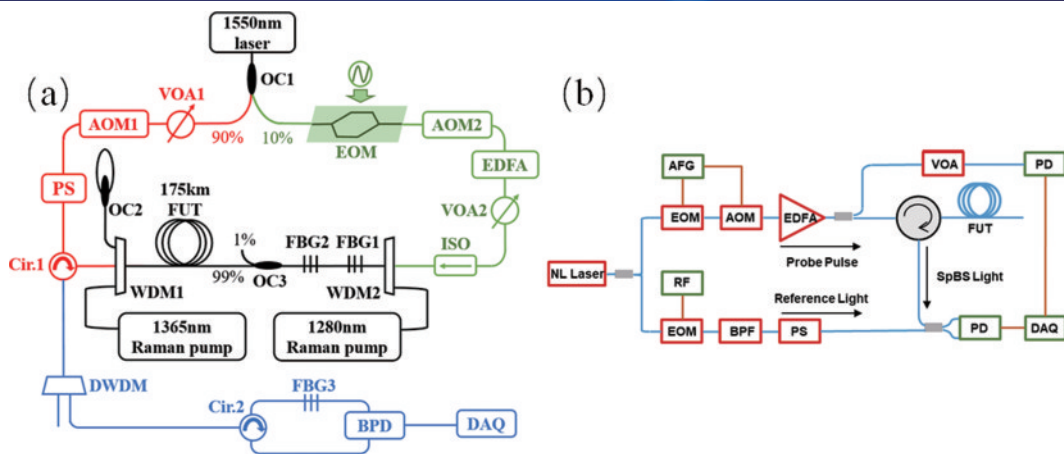
布里渊光纤分布式传感技术利用光纤中布里渊散射对温度和应变的依赖性,可以实现温度和应变的分布式传感,并且具有高精度、长距离的特点,在智能电网、边坡隧道、森林油罐、大型设备、土木建筑、交通管道等领域的结构健康监测中有着广泛的应用前景。根据定位方式的不同,布里渊分布式传感技术可以分为

“时域”^[1-8]、“相关域”^[9-12]以及“频域”^[13-14]三类。每一类又可以分为基于受激布里渊散射(SBS)的“分析仪”和基于自发布里渊散射(SpBS)的“反射仪”。其中,布里渊光时域分析(BOTDA)和布里渊光时域反射(BOTDR)受到了最广泛的研究和关注^[15-20]。基于光纤中的受激布里渊散射的BOTDA传感技术的工作原理如图1(a)所示,在传感光纤两端分别通入相向传输的一束连续探测光和一束脉冲泵浦光,当两束光的频

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-10-27; 录用日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(62165002)、广西重点研发计划项目(桂科 AB18221033)、广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目、桂林市科学研究与技术开发计划(20210217-3)

通信作者: *hujh@mailbox.gxnu.edu.cn

图 1 探测原理示意图。(a)BOTDA^[19];(b) BOTDR^[20]Fig. 1 Schematic diagram of detection principle. (a) BOTDA^[19]; (b) BOTDR^[20]

差满足一定条件时会发生受激布里渊散射,有一部分能量从频率较高的泵浦光转移到频率较低的探测光上,通过检测光纤各位置探测光的功率改变量就可以得到该位置处的布里渊增益,扫描泵浦光与探测光之间的频差可以重构光纤各处的布里渊增益谱,然后利用洛伦兹等曲线拟合得到光纤各位置处的布里渊频移,最终实现应变和温度的分布式传感,BOTDA传感系统是个需要双端接入的系统。基于光纤中自发布里渊散射的BOTDR传感技术如图1(b)所示,探测脉冲光和散射光均在同一端,利用脉冲所产生的后向SpBS的飞行时间进行定位,并利用自发布里渊散射光的强度或布里渊频移进行传感,由于BOTDR传感系统单端接入的特性,即使光纤在某处发生断裂,断裂前的部分依然可以正常工作。

在传统BOTDA/R传感系统中,尽管系统结构和探测原理有所不同,但是在测量过程中,均需要进行扫频来获取光纤中的布里渊增益谱,并通过多个信号的平均来提高信号的信噪比,在解调过程中还需要通过洛伦兹拟合来获取光纤中的布里渊频移(BFS),整个过程十分耗时,导致传统的BOTDA/R传感系统难以用于动态参数的测量。针对上述问题,学者们提出了多种解决技术方案,例如斜坡辅助BOTDA/R技术、捷变频BOTDA/R技术、啁啾链BOTDA/R技术和光频梳BOTDA技术等^[21-27],这些方案使得BOTDA/R系统不再仅限于静态参数的测量,极大地扩展了BOTDA/R应用范围。与传统的技术相比,斜坡辅助BOTDA/R技术通过解调信号增益来实现动态参数的测量,无需扫频和对信号进行洛伦兹拟合,极大缩短系统采样时间,但是该技术的测量应变动态范围受限于布里渊散射谱的斜坡线性区域。捷变频BOTDA/R技术极大地减少扫频时微波源的频率切换时间,提高系统的传感速度,但是该方案需要较为复杂的频率控制,需要用到频率切换时间在ns量级的高带宽任意波形发生器(AWG),价格昂贵。啁啾

链BOTDA/R技术将入射光进行调制成多个频率的啁啾链,单次脉冲扫描即可得到完整的信息,但是频率控制较为复杂,空间分辨率不够高。光频梳BOTDA技术传感速度仅受限于信号平均次数和传感距离,但空间分辨率和传感精度相互制约,难以同时提升。本文从BOTDA/R系统在动态应变测量的限制因素分析出发,根据工作原理的不同分别综述了近年来BOTDA/R技术在动态参数测量方面的研究进展。

2 动态应变测量的限制因素及解决方案

对于动态应变测量,其限制因素主要集中在以下几个方面:

1)发射脉冲重复频率 f 。为了避免两个脉冲信号之间的串扰,单个脉冲的飞行时间应大于相邻两个脉冲发射的间隔时间,因此脉冲重复频率的倒数应小于光在光纤中传输的往返时间,即 $f < 2nL/c$,其中, L 为传感光纤的长度, n 为光纤折射率, c 为真空中的光速,因此发射脉冲重复频率受限于光纤长度。

2)信号累加平均次数 N 。为了提高系统的信噪比,实际测量通常需对探测信号进行多次累计平均处理,信号累加平均次数 N ,则需要耗时 N/f 。针对这一问题,可通过数据后处理的方法来解决,常见的方法为图像去噪^[28-30]。将测量得到的布里渊谱转为灰度图像,利用图像去噪降低信号噪声,降低信号平均次数,缩短采样时间。也可以采用脉冲编码^[31-34]等技术,提高信噪比,减少在信号累加平均次数。

3)光频率切换时间。在进行频率扫描时,光波频率切换的时间通常由电学调制频率的切换时间决定,通常在毫秒量级。捷变频BOTDA/R系统利用高性能的任意波发生器将频率的切换缩短到ns量级,与传统技术相比,大大减少了频率切换时间^[23,35]。

4)扫描频率的个数。为了获得布里渊增益谱

(BGS),需要对频率点进行逐点扫描。为了在拟合过程中提高 BFS 的精度以及获得更大的温度应变探测范围,通常需要更小的频率间隔以及更大的频率扫描范围,这都会增加扫描频率点的个数,极大地延长测量时间。斜坡辅助技术^[21]利用布里渊增益谱斜坡上 BFS 和布里渊增益的线性对应关系,因此只需利用单个频率的时域信号就能实现 BFS 的解。啁啾链^[26,36]技术将入射光调制成时域上频率连续变化的啁啾链,通过单次扫描即可获得完整的布里渊谱信息。光频梳^[37-39]技术采用在频域上具有多个分量的光频梳作为入射光,并且泵浦光和探测光具有不同的频率间隔,因此各个频率分量具有不同的频率差,进而可以完成对布里渊增益谱的扫描。

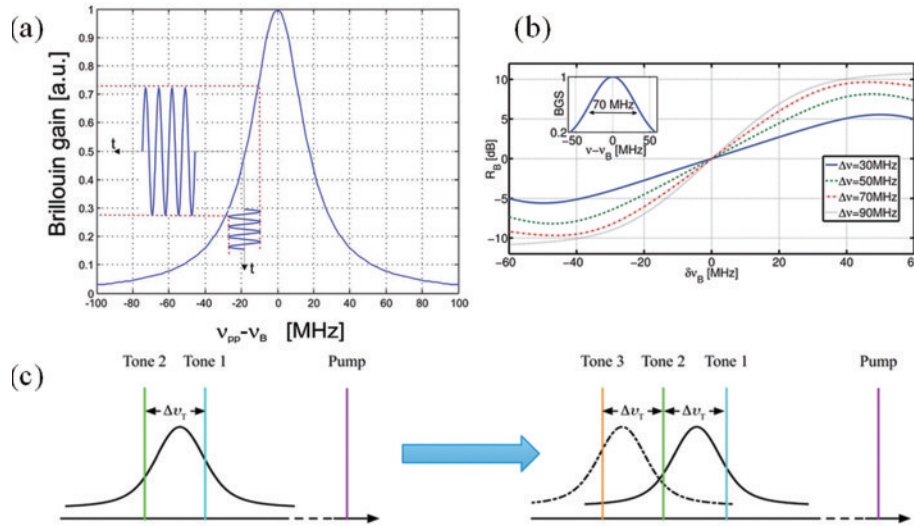


图2 斜坡辅助技术原理。(a)斜坡辅助实验原理^[21];(b)双斜坡辅助BOTDA原理^[40];(c)多斜坡辅助BOTDA系统测量大范围动态应变原理^[41]

Fig. 2 Principle of slope-assisted technique. (a) Scheme of slope-assisted method^[21]; (b) schematic diagram of double SA-BOTDA^[40]; (c) measuring principle of large dynamic strain using BOTDA system based on multi-slope-assisted method^[41]

斜坡辅助法系统简单并且无需进行扫频,极大地缩短了系统的测量时间。但该方法的应变测量范围受限于斜坡上线性区域的大小,在普通单模光纤中一般为 30~40 MHz,能测得的最大应变不超过 800 $\mu\epsilon$ (@ 10 ns 泵浦脉冲)。为了扩大斜坡辅助技术的应变测量范围,2014 年, Motil 等^[40]提出了双斜坡辅助系统,如图 2(b)所示,该系统采用双频光进行探测,控制频率差分别位于 BGS 的两侧斜坡上,通过两个布里渊增益的比值来进行探测,该方法不受泵浦功率波动的影响,最终传感系统在 50 m 的光纤上实现了振动频率 100 Hz、应变为 47.7 $\mu\epsilon$ 的动态应变测量,空间分辨率为 1.5 m。2016 年, Hu 等^[42]提出在扫描布里渊增益谱的过程中,同时将每一个频点的时域信号利用斜坡辅助技术实现动态应变的测量,这样在完成布里渊增益谱扫描测量温度的同时可以实现多次动态应变的测量,系统在 10.6 km 的传感光纤上获得了 3 m 的空间分辨率,1.2 $^{\circ}\text{C}$

3 基于斜坡辅助技术的 BOTDA/R 传感系统

3.1 基于斜坡辅助的 BOTDA 系统

基于斜坡辅助的 BOTDA 系统于 2009 年被 Bernini 等^[21]首次提出来,其原理如图 2(a)所示。在 BGS 单侧斜坡的部分区域内,可以近似地认为 BFS 与布里渊增益是线性对应关系,在进行探测时,将泵浦光与探测光的频率差固定在该区域内的某一点,当 BFS 变化时布里渊增益也相应地线性变化,探测到的光强也随之变化,因此可以通过测量光强的变化解调出 BFS 的变化。研究结果显示,传感系统在 30 m 的光纤上实现了空间分辨率为 3 m、最大应变约为 500 $\mu\epsilon$ 、频率为 12.3 Hz 的动态应变信号测量。

温度精度和 0.67 Hz 频率测量分辨率。

为了进一步扩大应变范围,2016 年, Ba 等^[41]在双斜坡辅助的基础上提出了多斜坡辅助技术,将双频探测光利用快速捷变频技术扩展为多频光,通过探测 BGS 谱线上不同位置增益的比值对应变的测量范围进行了扩展。原理如图 2(c)所示,当 BFS 位于探测频率 1 和探测频率 2 之间时,通过探测频率 1 的增益与探测频率 2 的增益之间的比值来实现 BFS 的解调,当 BFS 变化导致探测频率 1 和 2 都位于 BGS 斜坡同一侧,而 BFS 位于探测频率 2~3 之间时,可以通过探测频率 2 和 3 的增益比值来实现 BFS 的解调。因此,通过增加探测光频率对可以显著地扩大 BFS 的解调范围,传感系统最终在 32 m 的光纤上以 1 m 的空间分辨率实现了振动频率为 12.8 Hz,最大应变为 5000 $\mu\epsilon$ 的动态应变测量。

除了增加斜坡数量之外,还可以通过扩展单个斜

坡的线性应变区域来增加应变的测量范围。2017 年, Yang 等^[43]报道了一种矢量 BOTDA 传感系统, 探测原理如图 3(a) 所示。通过同时测量光纤布里渊增益谱与布里渊相位谱来扩展单个斜坡的应变测量范围, 定义布里渊相位谱与布里渊增益谱的比值为相位-增益比, 并通过相位-增益比与 BFS 的线性对应关系实现 BFS 的解调, 具体的实验步骤如图 3(b) 所示。相干光源分为两路分别作为泵浦光和探测光, 泵浦光被声光

调制器调制成脉冲, 并经过扰偏器后进入测试光纤中。探测光经过强度调制器后形成两个边带, 并用光学带通滤波器滤出所需边带, 再将探测光分为两路, 其中一路被声光调制器调制产生频移后与另一路形成拍频信号, 再输入到测试光纤中与泵浦光相互作用, 最后滤除瑞利散射光后被探测器接收完成相干探测。该方案实现了传感距离 2 km、空间分辨率 2.5 m、振动频率 20 Hz、幅值 1000 $\mu\epsilon$ 的动态应变测量。

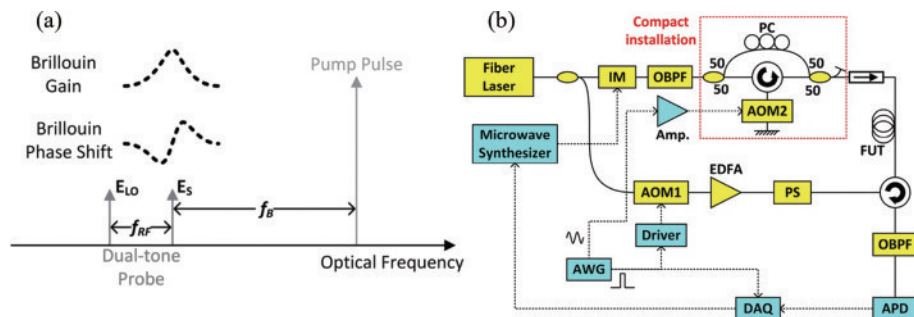


图 3 矢量 BOTDA 工作原理^[43]。(a) 矢量探测原理; (b) 矢量 BOTDA 系统实验原理

Fig. 3 Operating principle of vector BOTDA^[43]. (a) Principle of vector detection; (b) scheme of vector BOTDA

同年, Zhou 等^[44]结合捷变频技术和多斜坡辅助技术, 提出了一种大动态应变矢量 BOTDA 系统, 利用相位-增益比扩展单个斜坡的线性区域范围, 并利用捷变频技术产生等频率间隔的脉冲串, 通过对多个相位-增益比的探测范围进行“拼接”以探测大动态应变, 其探测结果如图 4 所示。图中展示了不同频率切换间隔下多斜坡 F-BOTDA 系统解调的振动信号与参考信号的对比, 在频率间隔为 80 MHz 和 120 MHz 时, 探测到的振动信号与参考信号吻合得最好, 在频率间隔为 160 MHz 时信号底部有轻微的失真, 在频率间隔为 180 MHz 时信号底部出现严重失真, 因此最大的频率间隔为 160 MHz, 是传统基于 BGS 的多斜坡辅助 BOTDA 系统的 2 倍。实验中在 50 m 的保偏光纤上测得了空间分辨率为 3 m、主频为 5.58 Hz 和二次谐波为 11.14 Hz 的振动信号, 其最大的动态应变改变量可以达到 5372.9 $\mu\epsilon$ 。

在上述 SA-BOTDA 系统中, 采用捷变频技术来快速切换探测光的频率实现多斜坡辅助探测, 以降低采样率为代价获得了较宽的动态应变范围。针对该问题, 2019 年, Zheng 等^[45]提出了新的相干探测多斜坡 BOTDA 系统, 探测原理如图 5(a) 所示。探测光的频率不再是由 AWG 在时域上进行快速切换, 而是多个频率的探测光同时输入光纤中与泵浦光相互作用, 这种情况下就可以在单个脉冲周期同时获得全部频率的布里渊增益信息和相移信息, 有效地提高了系统的采样率。研究表明, 该方案在 2 km 的传感距离上实现了空间分辨率为 2.5 m、振动频率为 41 Hz、幅值为 2546 $\mu\epsilon$ 的大动态应变测量。

此外, Yang 等^[46]在 2018 年提出了另一种扩大单

斜坡线性区域的方案, 原理如图 5(b) 所示, 泵浦脉冲由两组不同频率间隔的双边带光组成, 通过控制频率间隔和泵浦光的能量, 可以有效地操控 BGS 的形状。该方法实现了 100 MHz 左右的应变动态测量范围, 理论上可实现 2000 $\mu\epsilon$ 的动态应变测量, 但因为使用的激励器振幅有限, 最终实现了空间分辨率 2.5 m、振动频率 80 Hz、动态范围 -75~875 $\mu\epsilon$ 的应变测量。

3.2 基于斜坡辅助的 BOTDR 系统

SA-BOTDA 通过探测光能量的变化来实现动态应变的解调, 2017 年, Maraval 等^[22]将斜坡技术引入 BOTDR 系统中, 其实验步骤如图 6 所示。与斜坡辅助 BOTDA 系统中不同的是, SA-BOTDR 系统需要额外增加一个电学带通滤波器, 通过检测带通滤波器信号的能量变化实现动态应变解调。研究表明, 在 100 m 的光纤上实现空间分辨率 1 m、振荡频率 1.1 Hz, 最大应变 200 $\mu\epsilon$ 的动态测量。

2022 年, 本课题组将渐变折射率多模光纤作为传感光纤, 通过单模光纤和多模光纤错位熔接的方式控制多模光纤中各个模式的能量分布, 操控各个模式叠加后 BGS 的形状, 最终实现大动态应变测量^[47]。不同错位熔接偏移量下仿真和实验获得的 BGS 如图 7 所示, 随着错位偏移量的增加, BGS 的带宽明显增大, 并在经过一个电学带通滤波器后进一步展宽。在错位偏移量为 10 μm 时, 经过带通滤波器可以获得约 200 MHz 的线性区域。当最大应变为 3000 $\mu\epsilon$ 时, 在 1 km 渐变多模光纤上测得振动频率 15.47 Hz 的动态应变信号, 其中空间分辨率为 5 m。

为了进一步提升 SA-BOTDR 系统的性能, 2023 年本课题组提出了一种新的斜坡辅助测量方法^[48], 所提

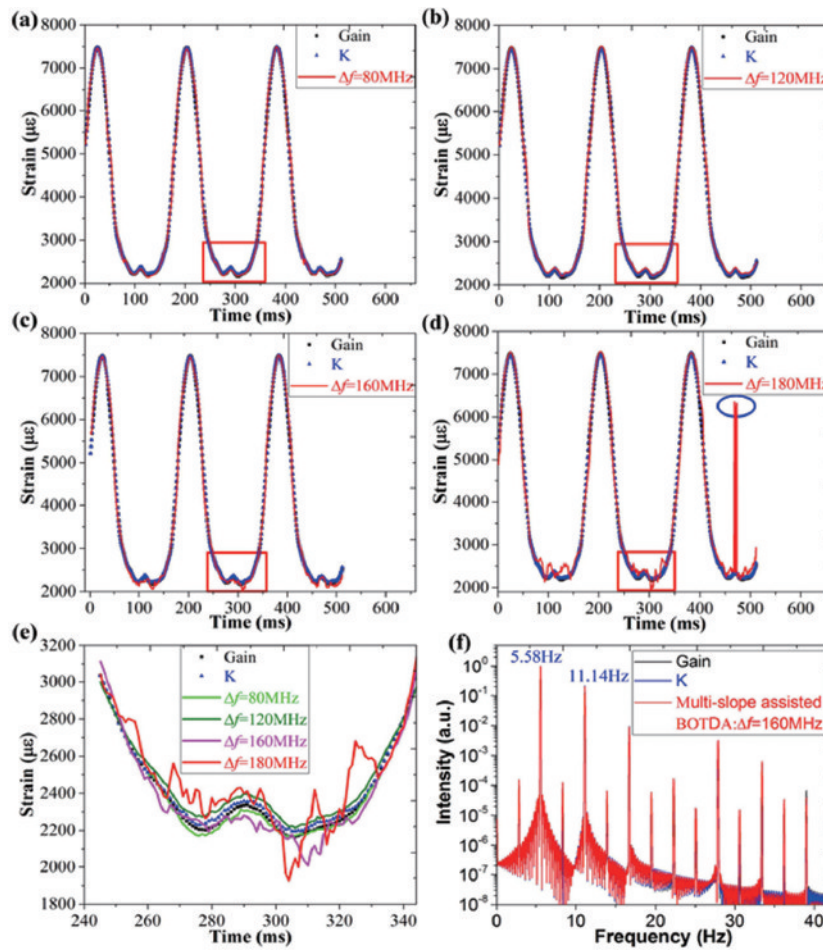


图4 不同频率间隔下动态应变测量结果^[44]。频率间隔分别为(a) 80 MHz, (b) 120 MHz, (c) 160 MHz, (d) 180 MHz的动态应变测量结果; (e)红色区域内的局部信号; (f)频率间隔为160 MHz时的能量谱

Fig. 4 Dynamic strain measurement results at different frequency intervals^[44]. Measuring results of dynamic with frequency span of (a) 80 MHz, (b) 120 MHz, (c) 160 MHz, and (d) 180 MHz, respectively; (e) local signals within solid red lines; (f) energy spectrum when the frequency interval is 160 MHz

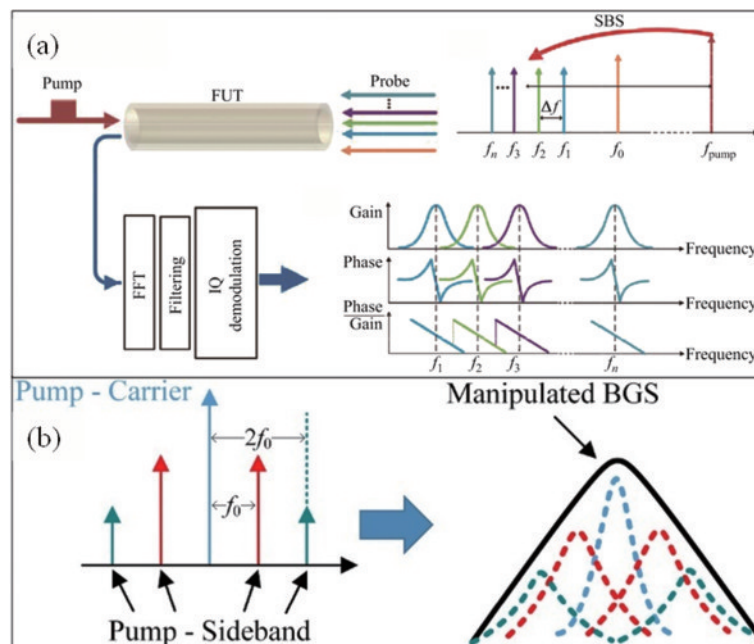
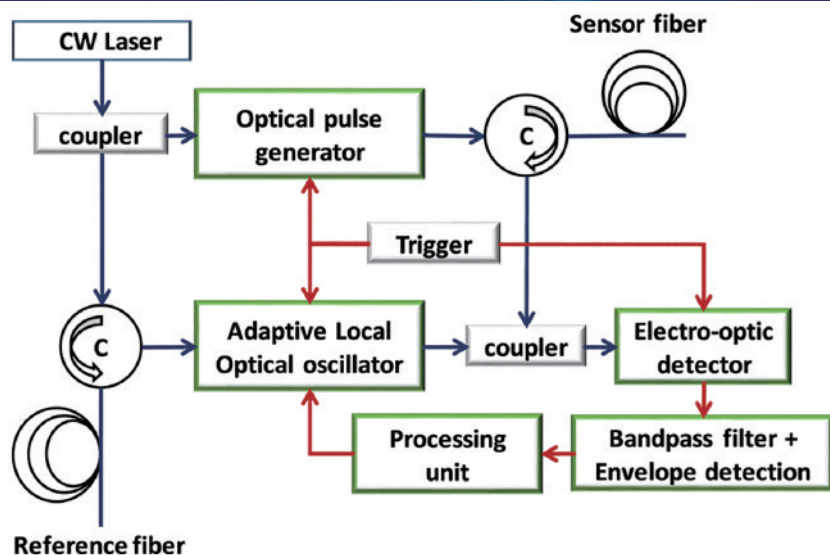
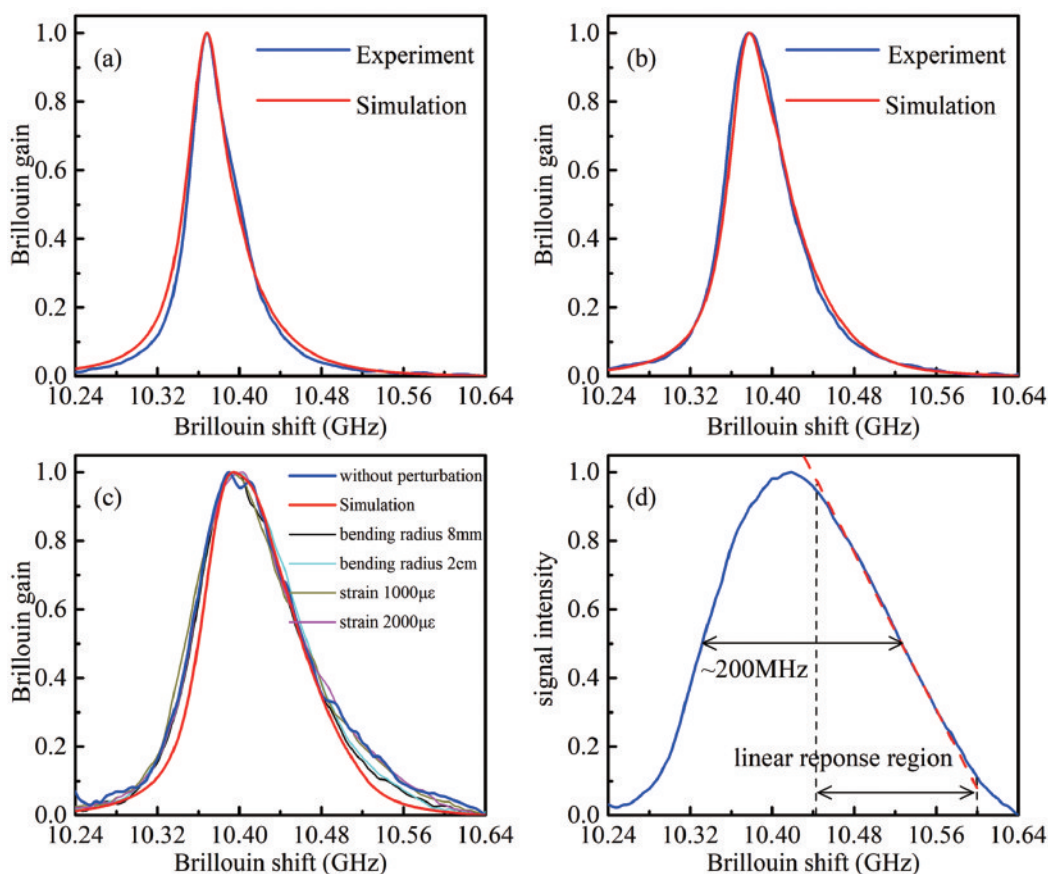


图5 工作原理。(a)相干多斜坡辅助BOTDA探测原理^[45]; (b)BGS形状操控原理^[46]

Fig. 5 Principle of operation. (a) Scheme of coherent multi-slope-assisted BOTDA system^[45]; (b) principle of BGS shape manipulation^[46]

图 6 斜坡技术引入 BOTDR 系统实验原理^[22]Fig. 6 Experimental principle of introducing slope technology into BOTDR system^[22]图 7 不同错位熔接偏移量下测得的归一化 BGS^[47]。错位熔接偏移量分别为(a) 0 μm , (b) 5 μm , (c) 8 μm 时的归一化 BGS; (d) 当偏移量为 8 μm 时, 经过一个中心频率为 220 MHz、带宽为 80 MHz 的带通滤波器后的归一化 BGSFig. 7 Normalized BGS measured under different lateral offsets^[47]. Normalized BGS with certain lateral offset of (a) 0 μm , (b) 5 μm , and (c) 8 μm ; (d) normalized BGS after passing through a bandpass filter with center frequency of 220 MHz and bandwidth of 80 MHz

出方法与传统斜坡辅助测量方法的原理对比如图 8 所示。在传统的斜坡辅助测量方法中, 线性区域基于 BGS 某一侧的斜坡, 探测信号为某单一频率分量或带通滤波器内频率的时域信号, 因此传统斜坡辅助测量

方法的应变探测范围受到 BGS 带宽的限制。

上述方法中, 利用一个频率均衡器对光电探测器带宽内的频率进行线性调制, 形成一个人工斜坡, 探测信号为在带宽内所有频率分量时域信号的叠加。在这

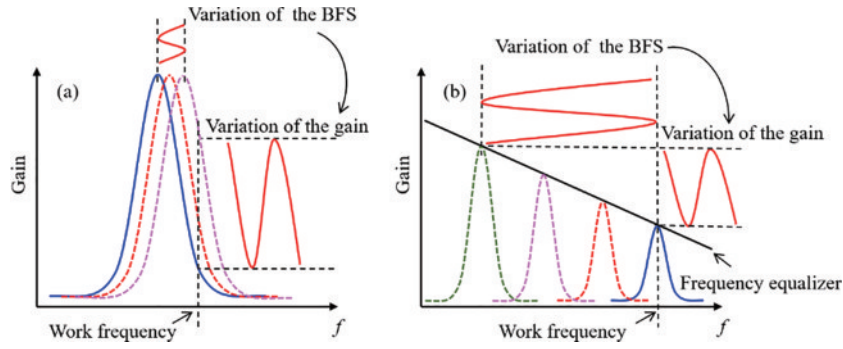


图8 传统斜坡辅助技术和频率均衡器的斜坡辅助技术的比较^[48]。(a)传统斜坡辅助技术原理;(b)基于频率均衡器的斜坡辅助技术原理

Fig. 8 Comparison between traditional slope assisted technique and frequency equalizer slope assisted technique^[48]. (a) Principle of traditional slope assisted technique; (b) principle of frequency equalizer slope assisted technique

种情况下,斜坡辅助的探测范围不再依赖于BGS的带宽,而是依赖于频率均衡器的调制带宽。研究结果表明,该方案在约1.94 km单模光纤的末端测得了空间分辨率5 m、最大应变量为3108 $\mu\epsilon$ 、振动频率13.1 Hz的动态应变,并且信号强度和应变之间有良好的线性度。

4 基于捷变频的BOTDA/R系统

在传统BOTDA系统中,泵浦光与探测光的频率差通常由微波源驱动的电光调制器产生,在探测过程

中微波源的频率切换时间较长,不利于动态传感。Peled等^[23]在2012年提出了基于捷变频技术的BOTDA传感系统,探测原理如图9(a)所示,当泵浦脉冲光频率固定时,通过AWG快速切换探测光的频率,并且在一个频率的持续时间内只与一个泵浦脉冲相互作用,当探测光频率固定时,利用AWG快速切换每个脉冲的频率进行探测,两种方法都能实现BGS的快速采集。研究表明,该方案在100 m光纤上实现了振动频率分别为100 Hz和80 Hz的两个动态应变事件的测量,系统的空间分辨率为1 m,最大应变测量值为800 $\mu\epsilon$ 。

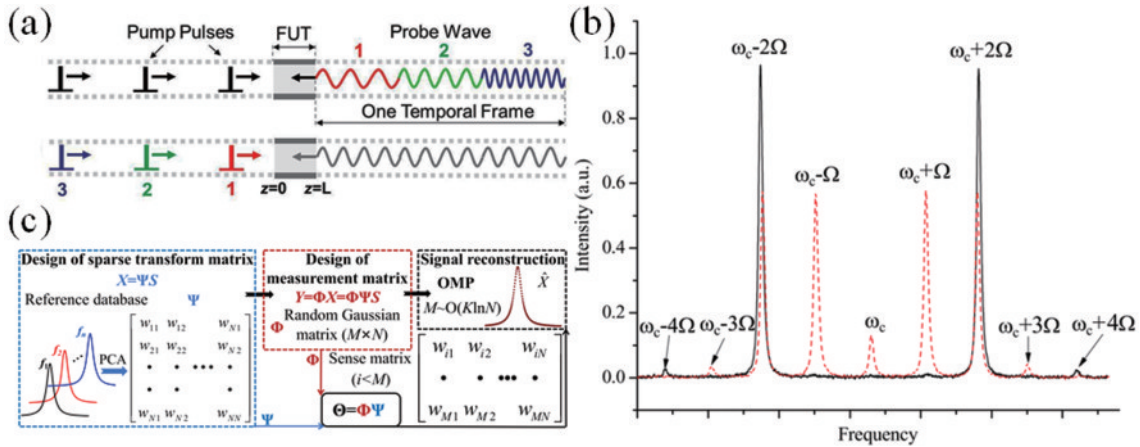


图9 工作原理。(a)基于捷变频技术的BOTDA系统原理^[23];(b)二阶边带调制^[49];(c)压缩采样和信号重构过程^[50]

Fig. 9 Working principle. (a) Principle of BOTDA system based on frequency agile technique^[23]; (b) second-order sideband modulation^[49]; (c) process of compressed sampling and signal reconstruction^[50]

对于普通的石英光纤,通信C波段的布里渊频移大约在10~11 GHz范围内,这意味着AWG的带宽也需要达到这个范围,而高性能的AWG十分昂贵,为了降低对AWG带宽的需求,2013年,Dong等^[49]提出了基于差分脉冲和二阶边带调制的快速BOTDA系统,如图9(b)所示。通过优化调制器使二阶边带处于主导地位,再经过光栅滤波后作为探测光进行探测。该方案可以降低AWG一半的带宽需求,在振动频率分别为50 Hz和33.3 Hz时,最大应变分别约为2700 $\mu\epsilon$ 和2000 $\mu\epsilon$,空间分辨率为20 cm,BFS的变化标准差

为0.7 MHz,对应的应变精度为14 $\mu\epsilon$ 。另外,2017年,Ba等^[51]提出了一种利用电光调制器和AWG双调制的捷变频技术,利用电光调制器产生移频约10 GHz的一阶边带,再利用AWG进行数百兆赫的移频就能使探测光与泵浦光的频率差覆盖光纤的BFS,进一步降低了对AWG带宽的需求。研究结果表明,传感系统在30 m长的光纤上实现了振动频率为11.8 Hz、空间分辨率为1 m、最大应变约3000 $\mu\epsilon$ 的动态应变测量。

除了对光路上进行改进,通过优化后端数据处理的方法也能提升基于捷变频技术BOTDA系统的性

能。2020 年,Chu 等^[50]提出了一种基于压缩感知和捷变频技术的快速 BOTDA 传感系统。如图 9(c)所示。通过主成分分析算法获得数据的自适应稀疏基,实现了 BGS 的稀疏表示,然后利用随机频率采样和正交匹配追踪算法成功地重建了 BGS 信号。基于传统快速 BOTDA 测量的原始数据和同一组数据随机频率采样后重建的结果显示测得的最大应变约为 $3200 \mu\epsilon$,振动频率约为 20 Hz,两者的相关系数为 0.9943,而随机频率采样所需的数据量仅为原始数据的 30%。该方法可以有效地减少数据量,提高动态应变的采样率。

在 BOTDR 方面,Wang 等^[24]在 2020 年将捷变频技术引入 BOTDR 传感系统之中,利用 AWG 实现 100 个频率分量的快速切换,单个频率分量的持续时间为 $2 \mu\text{s}$ 。在 175 m 单模光纤的末端测得振动频率分别为 6.82 Hz 和 14.77 Hz、对应的应变分别为 $3000 \mu\epsilon$ 和 $2500 \mu\epsilon$ 的动态应变信号,系统的空间分辨率为 2 m,BFS

变化的标准差为 1.47 MHz,对应的应变精度约为 $30 \mu\epsilon$ 。

5 基于啁啾链的 BOTDA/R 系统

在基于捷变频技术的传感系统之中,通过 AWG 改变探测光频率进行频率扫描以减小频率切换的时间间隔,其本质上还是传统的单个脉冲泵浦光与单个频率相互作用的方式,完成一次 BGS 的扫描过程往往需要多个脉冲。2018 年,Zhou 等^[25]提出了一种基于光学啁啾链的超快 BOTDA 传感系统,探测原理如图 10(a)所示。在该系统中探测光是由多个频率的光在时域上首尾相连组成的啁啾链,频率变化的周期为几十纳秒,当单个脉冲与探测光相互作用时,可以一次性获得各个频率探测光的布里渊增益信息,通过单次脉冲扫描即可得到完整的 BGS。研究结果表明,传感系统实现了空间分辨率为 2 m,最大应变约为 $500 \mu\epsilon$,振动频率为 31.8 Hz 的周期性机械振动的测量。

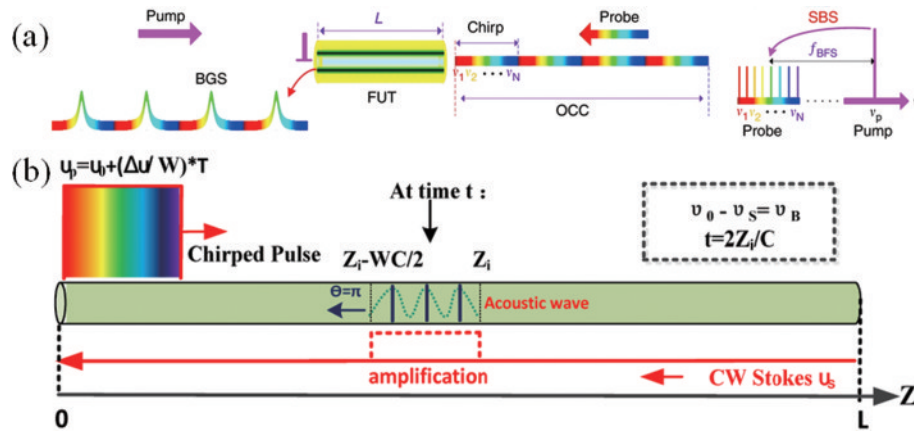


图 10 啁啾链 BOTDA 系统的工作原理。(a)啁啾链 BOTDA 系统测量原理^[25];(b)啁啾脉冲 BOTDA 系统测量原理^[52]

Fig. 10 Operation principle of BOTDA based on chirp chain. (a) Scheme of BOTDA based on chirp chain^[25]; (b) scheme of BOTDA based on chirp pulse^[52]

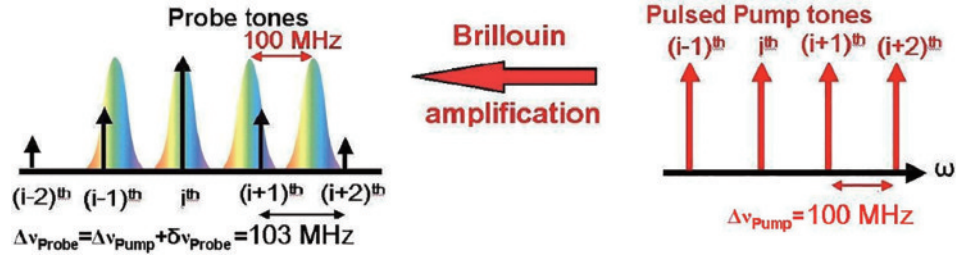
Wang 等^[52]在 2021 年提出了一种基于啁啾脉冲的快速 BOTDA 传感方案。测量原理如图 10(b)所示。利用啁啾脉冲作为泵浦信号,通过相邻布里渊信号之间的实时延迟提取相对 BFS 的变化。信号的时间延迟与 BFS 变化之间仿真结果显示,信号的时间延迟与 BFS 变化有非常显著的线性关系。由于需要利用布里渊信号迹线之间的对比来提出时间延迟,因此需要对比度较高的布里渊信号作为参考信号。在实验中利用 5 km 的轴向非均匀光纤作为传感光纤以获得剧烈波动的布里渊信号,传感系统获得了空间分辨率 4.5 m,振动频率为 10 Hz、振动幅度为 $120 \mu\epsilon$ 的振动事件,在一个振动周期的时间内能完成 1000 次测量,应变变化的标准差为 $8.52 \mu\epsilon$ 。

在 BOTDR 系统方面,Ba 等^[26]在 2020 年提出了基于光学啁啾链的 BOTDR 传感系统。利用时间宽度为 20 ns,频率宽度为 495 MHz 的锯齿模式啁啾链作为参考光,并用注入锁定方案实现参考光的绝对平坦功率

分布。最终在实验上实现了应变大于 $3200 \mu\epsilon$,空间分辨率为 2 m,振动频率为 31.58 Hz 的动态应变信号测量。

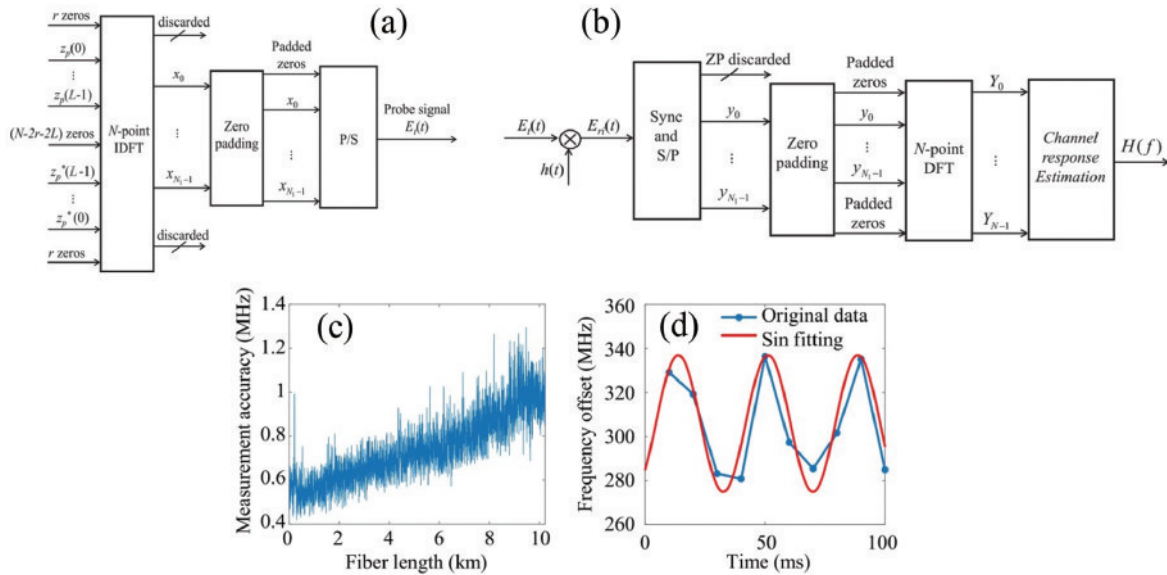
6 基于频率梳的 BOTDA 系统

除了基于时域上首尾相连的啁啾链进行探测外,还可以利用在频域上具有多个频率分量的光频梳完成单次测量。2011 年,Voskoboinik 等^[27]将泵浦光与探测光都调制成光频梳,在 2 km 和 20 m 的光纤上分别实现 50 m 和 5 m 的有效空间分辨率,如图 11 所示。其泵浦光和探测光分别为频率间隔为 100 MHz 的脉冲光和频率间隔为 103 MHz 的连续光,单次脉冲的探测过程等效于对 BGS 进行频率间隔为 3 MHz 的扫频过程,其中动态应变的测量范围需小于光频梳的频率间隔 (100 MHz)。2015 年该课题组^[53]通过利用多组不同频率间隔的光频梳进行探测又进一步地将动态范围扩展到了 GHz 频段。

图 11 光频梳 BOTDA 系统测量原理^[27]Fig. 11 Measuring principle of BOTDA based on frequency comb^[27]

在基于光学频分复用(OFDM)技术的 BOTDA 系统中,为了保证子载波之间的正交性,光频梳的持续时间与相邻频率探针之间的频率间隔成反比,因此需要在系统的空间分辨率和 BFS 探测精度之间权衡。针对此问题,2022 年, Yan 等^[54]提出了一种基于高频谱效率频分复用的 BOTDA 算法(SEFDM-BOTDA),如图 12 所示。通过设计 Zadoff-Chu 序列在时域上形成

一个能量集中的脉冲,并丢弃脉冲旁瓣形成 SEFDM 信号作为探测光输入,同时该信号子载波之间的频率间隔与 OFDM 信号保持一致。因此,该方法可以在保持精度的情况下获得更高的空间分辨率。实验结果如图 12(d)所示,传感系统在 10 km 传感范围内实现了 3.1 m 的空间分辨率和 1.294 MHz 的测量精度,并测量了振动频率为 26 Hz 的动态应变。

图 12 SEFDM-BOTDA 原理^[54]。SEFDM 信号(a)产生和(b)解调原理;(c)测量精度随光纤长度的变化;(d)动态应变信号Fig. 12 Principle of SEFDM-BOTDA^[54]. SEFDM signal (a) generation and (b) demodulation; (c) measuring accuracy change with fiber length; (d) dynamic strain signal

为进一步解决光频梳技术的空间分辨率有限的问题,2022 年 He 等^[55]将捷变频技术与光频梳技术结合,提高了系统的空间分辨率。原理如图 13 所示,利用捷变频技术对光频梳的频率进行快速切换,依次扫描待测光纤的布里渊谱,并引入二次方相位编码对光频梳进行相位调制以提高信噪比。传感系统在 10 km 单模光纤上实现了温度测量和波形为 40 Hz 方波的动态应变测量,其空间分辨率为 5 m。

7 其他动态应变测量方法

除了斜坡辅助、捷变频、啁啾链和光频梳等几个主流技术之外,一些新颖的动态应变传感方案也被提出^[56-64]。2021 年, Zhou 等^[65]提出了一种基于双波干涉

仪辅助 BOTDA 传感系统(DWI-BOTDA),探测原理如图 14(a)和(b)所示,通过相位调制器使探测光产生三个频率的光,其中两个组成 DWI 用于探测振动信号,剩余一个频率与泵浦光相互作用组成 BOTDA 系统用于对动态事件进行定位,利用频率映射的方法实现 DWI 测量的动态事件与 BOTDA 定位的动态事件的一一对应。图 14(c)为基频和谐波频率分别为 24.8 Hz 和 49.6 Hz 的动态事件测量结果,可以看出 DWI 的测量结果与 BOTDA 测量结果基本相同,但是 DWI 的信号具有更高的采样率可以达到 10 kHz,因此该方案可以支持高频的动态应变测量。利用 DWI-BOTDA 实现了采样率 10 kHz、空间分辨率 2 m、传感距离 2 km 的动态测量。

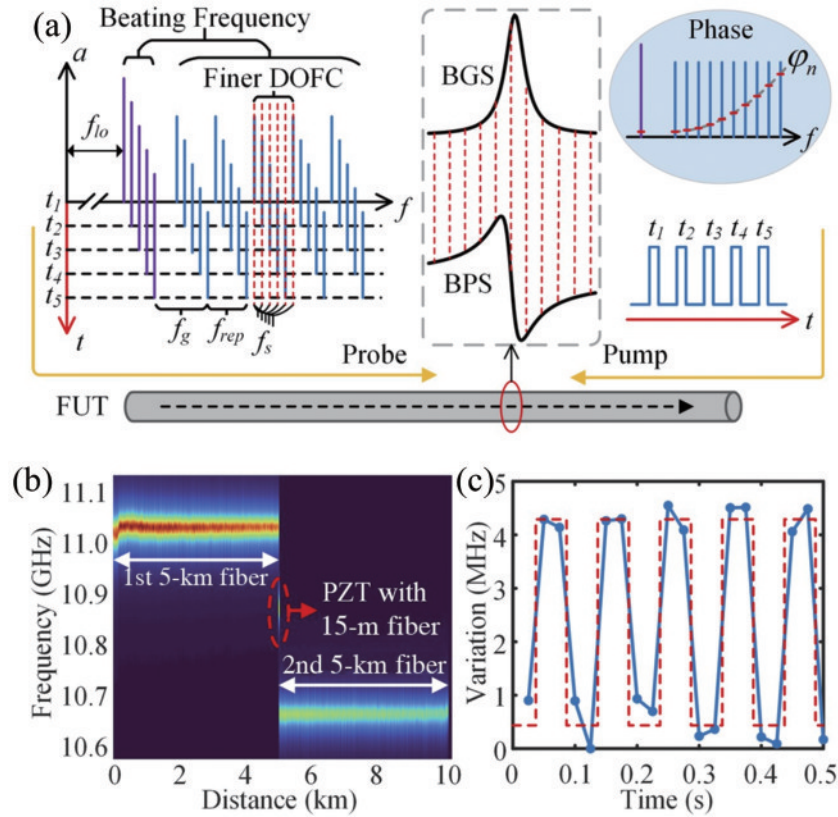


图 13 结合捷变频技术和光频梳技术 BOTDA 方案^[55]。(a) 系统探测原理; (b) 光纤的 BGS 信号; (c) 振动区域 BFS 随时间的变化
Fig. 13 Scheme of fast BOTDA combined frequency agile technique and optical frequency comb technique^[55]. (a) Detection principle of the system; (b) BGS of the fiber; (c) BFS change with time in vibration region

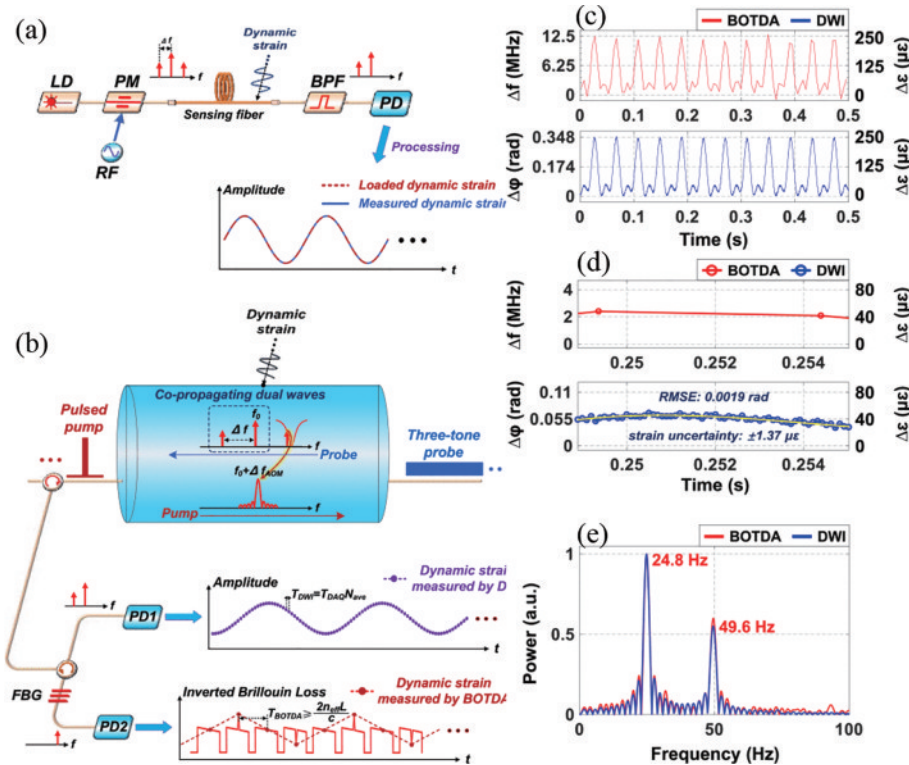


图 14 DWI-BOTDA 动态传感系统^[65]。(a) DWI 和 (b) DWI-BOTDA 测量原理; 动态应变的 (c) 时域和 (e) 频域信号; (d) 振动信号的均方差
Fig. 14 DWI-BOTDA dynamic sensing system^[65]. Measurement principle of (a) DWI and (b) DWI-BOTDA; dynamic strain in (c) time domain and (e) frequency domain; (d) mean square deviation of vibration signal

8 结束语

布里渊分布式光纤传感系统可以对几十甚至上百千米的光纤进行全分布式温度、应变测量,并且与传统的电学传感器相比,具有抗电磁干扰、空间分辨率高、传感距离长等优点。斜坡辅助技术具有系统结构简单、响应速度快等优点,但其动态测量范围受到布里渊散射谱带宽的限制。捷变频技术空间分辨率高,但是所需的高性能 AWG 价格昂贵,并且本质上还是需要扫频,限制了应变的采样率。光频梳技术传感速度快,但是需要在空间分辨率和传感精度之间相互制约。啁啾链技术传感速度快、空间分辨率高,但是系统结构和解调过程较为复杂。随着继续深入研究,各种技术之间的相互融合和突破,布里渊光时域分布式传感系统会朝着高空间分辨率、大动态范围的方向去发展,并且越来越实用化。因此,光时域布里渊分布式传感技术在大型基础设施安全监测方面拥有极为广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wang Q L, Bai Q, Liang C S, et al. Random coding method for SNR enhancement of BOTDR[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11604-11618.
- [2] Peng J Q, Lu Y G, Zhang Y Y, et al. Distributed strain and temperature fast measurement in Brillouin optical time-domain reflectometry based on double-sideband modulation[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1511-1520.
- [3] Zhou X, Wang F, Liu Z, et al. Hybrid B-OTDR/ Φ -OTDR for multi-parameter measurement from a single end of fiber[J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29117-29127.
- [4] Liu S Q, Shao L Y, Yu F H, et al. Quantitative demodulation of distributed low-frequency vibration based on phase-shifted dual-pulse phase-sensitive OTDR with direct detection[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 10096-10109.
- [5] Li S, Xu Y P, Feng Y R, et al. Broadband vibration signal measurement based on multi-coset sampling in phase-sensitive OTDR system[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2): 1295-1300.
- [6] Murray J B, Redding B. Combining Stokes and anti-Stokes interactions to achieve ultra-low noise dynamic Brillouin strain sensing[J]. APL Photonics, 2020, 5(11): 116104.
- [7] 黄秋茗, 陈映恺, 刘鑫煜, 等. 利用寻极大值法实现布里渊光时域反射技术频移快速定位及空间分辨率增强[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1406004.
Huang Q M, Chen Y K, Liu X Y, et al. Fast positioning of Brillouin optical time domain reflectometry frequency shift and enhancement of spatial resolution using Maximum Seeking method[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1406004.
- [8] 尉婷, 龙万江, 吴冰冰, 等. 油气管道分布式光纤布里渊散射应变的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2106003.
- [9] Wei T, Long W J, Wu B B, et al. Simulation research on distributed optical fiber Brillouin scattering strain in oil and gas pipelines[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2106003.
- [10] Mizuno Y, Hayashi N, Fukuda H, et al. Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(12): e16184.
- [11] Zhang J Z, Wang Y H, Zhang M J, et al. Time-gated chaotic Brillouin optical correlation domain analysis[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17597-17607.
- [12] 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.
- [13] 江岳凯, 路元刚, 姚雨果, 等. 基于大调制中心频率的布里渊光相关域反射技术[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1306005.
- [14] Jiang Y K, Lu Y G, Yao Y G, et al. Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on large modulation center frequency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(13): 1306005.
- [15] Kapa T, Schreier A, Krebber K. 63 km BOFDA for temperature and strain monitoring[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1600.
- [16] 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.
- [17] Dong P, Xia K W, Wu B B, et al. A quasi-distributed monitoring method for ground settlement using pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis[J]. Measurement, 2020, 151: 107284.
- [18] Lopez-Mercado C A, Korobko D A, Zolotovskii I O, et al. Application of dual-frequency self-injection locked DFB laser for Brillouin optical time domain analysis[J]. Sensors, 2021, 21(20): 6859.
- [19] Liehr S, Borchardt C, Münzenberger S. Long-distance fiber optic vibration sensing using convolutional neural networks as real-time denoisers[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 39311-39325.
- [20] He Q, Jiang H, Wang Z Q, et al. Spatial resolution enhancement of DFT-BOTDR with high-order self-convolution window[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 57: 102188.
- [21] Fu Y, Zhu R C, Han B, et al. 175-km repeaterless BOTDA with hybrid high-order random fiber laser amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4680-4686.
- [22] Wu H T, Guo N, Feng D Q, et al. Enhancing spatial resolution of BOTDR sensors using image deconvolution [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19652-19664.
- [23] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [24] Maraval D, Gabet R, Jaouen Y, et al. Dynamic optical fiber sensing with Brillouin optical time domain

- reflectometry: application to pipeline vibration monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3296-3302.
- [23] Peled Y, Motil A, Tur M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8584-8591.
- [24] Wang B Z, Hua Z J, Pang C, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry based on the frequency-agile technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 946-952.
- [25] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 32.
- [26] Ba D X, Wang B Z, Li T F, et al. Fast Brillouin optical time-domain reflectometry using the optical chirp chain reference wave[J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5460-5463.
- [27] 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.
- [28] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10870.
- [29] Meng Y J, Zha J F, Liu Y X. Intensifying the SNR of BOTDA using adaptive constrained least squares filtering[J]. Optics Communications, 2019, 437: 219-225.
- [30] Li B, Jiang N J, Han X L. Denoising of BOTDR dynamic strain measurement using convolutional neural networks[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1764.
- [31] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F, et al. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 259-261.
- [32] Zhou Y, Yan L S, Liu C, et al. Hybrid aperiodic coding for SNR improvement in a BOTDA fiber sensor[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33926-33936.
- [33] Liu S S, Zhang X C, Zhang Y T, et al. Numerical investigation of golay coding Brillouin optical time-domain analysis system based on π -phase pulse[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3): 2190-2197.
- [34] 刘钦, 黄劲, 梁浩, 等. 基于布里渊增益-损耗效应的编码 DPP-BOTDA 传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0928005.
- Liu Q, Huang J, Liang H, et al. Coded DPP-BOTDA sensor based on Brillouin gain-loss effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0928005.
- [35] Zheng H, Zhang J D, Zhu T, et al. Fast distributed Brillouin optical fiber sensing based on pump frequency modulation[J]. Applied Physics Express, 2018, 11(7): 072502.
- [36] Wang B Z, Fan B H, Zhou D W, et al. High-performance optical chirp chain BOTDA by using a pattern recognition algorithm and the differential pulse-width pair technique[J]. Photonics Research, 2019, 7(6): 652-658.
- [37] Voskoboinik A, Wang J, Shamee B, et al. SBS-based fiber optical sensing using frequency-domain simultaneous tone interrogation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(11): 1729-1735.
- [38] Jin C, Guo N, Feng Y H, et al. Scanning-free BOTDA based on ultra-fine digital optical frequency comb[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5277-5284.
- [39] 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.
- [40] Motil A, Danon O, Peled Y, et al. Pump-power-independent double slope-assisted distributed and fast Brillouin fiber-optic sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(8): 797-800.
- [41] 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.
- [42] Hu J H, Xia L, Yang L, et al. Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13610-13620.
- [43] Yang G Y, Fan X Y, He Z Y. Strain dynamic range enlargement of slope-assisted BOTDA by using Brillouin phase-gain ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(20): 4451-4458.
- [44] 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.
- [45] Zheng H, Feng D Q, Zhang J D, et al. Distributed vibration measurement based on a coherent multi-slope-assisted BOTDA with a large dynamic range[J]. Optics Letters, 2019, 44(5): 1245-1248.
- [46] Yang G Y, Fan X Y, Wang B, et al. Enhancing strain dynamic range of slope-assisted BOTDA by manipulating Brillouin gain spectrum shape[J]. Optics Express, 2018, 26(25): 32599-32607.
- [47] Liu G, Lu H L, Tang J, et al. Large dynamic strain range slope-assisted Brillouin optical time domain reflectometry based on a graded-index multi-mode fiber[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 37281-37292.
- [48] Liu G, Zou D J, Wei R X, et al. Large dynamic strain measurement via slope-assisted Brillouin optical time domain reflectometry using a frequency equalizer[J]. Optics Letters, 2023, 48(6): 1407.
- [49] 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.
- [50] Chu Q, Wang B Z, Wang H N, et al. Fast Brillouin optical time-domain analysis using frequency-agile and compressed sensing[J]. Optics Letters, 2020, 45(15): 4365-4368.
- [51] 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): 7102908.
- [52] Wang Y, Chen L, Bao X Y. Single-shot chirped pulse BOTDA for static and dynamic strain sensing[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5774-5777.
- [53] 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.
- [54] Yan Y X, Wang Y, Zheng H, et al. Dynamic BOTDA based on spectrally efficient frequency-division multiplexing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(13): 4451-4457.
- [55] He H, Zhao Z Y, Fu S N, et al. High spatial resolution fast Brillouin optical time-domain analysis enabled by frequency-agility digital optical frequency comb[J]. Optics Letters, 2022, 47(14): 3403-3406.
- [56] Zheng H, Yan Y X, Wang Y Y, et al. Deep learning enhanced long-range fast BOTDA for vibration measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(1): 262-268.
- [57] Masoudi A, Belal M, Newson T P. Distributed dynamic large strain optical fiber sensor based on the detection of spontaneous Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3312-3315.
- [58] Lu Y G, Qin Z G, Lu P, et al. Distributed strain and temperature measurement by Brillouin beat spectrum[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(11): 1050-1053.
- [59] Peng J Q, Lu Y G, Zhang Z L, et al. Distributed temperature and strain measurement based on Brillouin gain spectrum and Brillouin beat spectrum[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(21): 1217-1220.
- [60] 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.
- [61] Wu H T, Guo N, Zhong Z X, et al. High-performance distributed dynamic strain sensing by synthesizing φ -OTDR and BOTDR[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 18098-18108.
- [62] Ba D X, Qiu L Q, Chu Q, et al. High-resolution and large-strain distributed dynamic sensor based on Brillouin and Rayleigh scattering[J]. Optics Letters, 2022, 47(22): 5777-5780.
- [63] Koizumi K, Kanda Y, Fujii A, et al. High-speed distributed strain measurement using Brillouin optical time-domain reflectometry based-on self-delayed heterodyne detection[C]//2015 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 27-October 1, 2015, Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2015.
- [64] Esmailzadeh Noghani F, Tofighi S, Pishbin N, et al. Fast and high spatial resolution distributed optical fiber sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 277-288.
- [65] Zhou Y, Yan L S, He H J, et al. DWI-assisted BOTDA for dynamic sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3599-3606.