

# 激光与光电子学进展

## 混沌布里渊光相关域分析技术进展

王亚辉<sup>1,2</sup>, 赵乐<sup>1</sup>, 张倩<sup>1,2</sup>, 乔丽君<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 张建忠<sup>1,2</sup>, 张明江<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 分布式光纤传感技术已广泛应用于基础设施的健康监测、军事国防安全等领域,长距离高空间分辨率的混沌布里渊光相关域分析(chaotic BOCDA)技术具有广阔的发展和应用前景。Chaotic BOCDA 以类噪声、宽频带、宽光谱的混沌激光为探测信号,分别利用其类  $\delta$  函数特性拓展传感距离、利用自相关特性提高空间分辨率以及利用高斯型光谱特性获得本征展宽的布里渊增益谱。基于上述特性,分别综述了 10.2 km 长传感距离、3.5 mm 高空间分辨率和 1200  $\mu\epsilon$  大范围动态应变监测的 chaotic BOCDA 系统。此外,还分析讨论了 chaotic BOCDA 技术的优缺点,并对其发展前景进行了展望。

**关键词** 光纤传感器; 混沌激光; 受激布里渊散射; 布里渊光相关域分析; 高空间分辨率

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306011

## Progress in Chaotic Brillouin Optical Correlation-Domain Analysis

Wang Yahui<sup>1,2</sup>, Zhao Le<sup>1</sup>, Zhang Qian<sup>1,2</sup>, Qiao Lijun<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>,  
Zhang Jianzhong<sup>1,2</sup>, Zhang Mingjiang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,  
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Distributed optical fiber sensing technology has been widely applied in the areas of infrastructure health monitoring, national defense security and etc. Long-reach high-spatial-resolution chaotic Brillouin optical correlation-domain analysis (chaotic BOCDA) technology has extensive development and application prospects. Chaotic laser of noise-like, wide-band radio frequency spectrum and broadband optical spectrum is served as signal source in chaotic BOCDA. Therefore, the sensing distance is extended by its  $\delta$ -like function, the spatial resolution is improved by its auto-correlation property, and the intrinsically broadened Brillouin gain spectrum is obtained by its Gaussian optical spectrum. Based on these characteristics, this review article provides an overview of our recent progresses in chaotic BOCDA system with 10.2 km-long sensing distance, 3.5 mm-high spatial resolution and 1200  $\mu\epsilon$ -large dynamic range. Moreover, the relative merits and avenues for future research and development of chaotic BOCDA technology are also discussed and prospected.

**Key words** fiber optics sensors; chaotic laser; stimulated Brillouin scattering; Brillouin optical correlation-domain analysis; high spatial resolution

**OCIS codes** 060.2370; 140.1540; 290.5900; 190.4370

收稿日期: 2021-02-21; 修回日期: 2021-03-31; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(62075151, 62075153, 61875146, 61527819)、山西省重点研发计划(高新领域)项目(201903D121177, 201803D121064)、山西省“三晋学者”特聘教授(专家)支持计划(201617)

通信作者: \*zhangmingjiang@tyut.edu.cn

## 1 引言

光纤传感技术是 20 世纪 80 年代随着低损耗光纤问世和光纤通信技术发展而兴起的新一代传感技术<sup>[1-2]</sup>。光纤传感系统具备低成本、小体积、抗电磁干扰、强抗辐射、适于恶劣环境等独特优势<sup>[3]</sup>,进而被广泛应用于大型土木工程、交通基础设施、智能电网、航空航天和国防安全等诸多领域<sup>[4-8]</sup>,已成为衡量一个国家信息化实力是否强大的标志。随着现代工业传感网络的迅速发展,长测量距离和高空间分辨率兼顾的多参量实时监测需求日趋迫切。

目前,基于受激布里渊散射(SBS)的分布式光纤传感技术因具有监测距离长、空间分辨率高、测量精度高,以及可实现光纤沿线任意位置温度、应变、振动监测的优势而备受青睐<sup>[9-12]</sup>。根据工作原理不同,SBS 型分布式光纤传感技术可分为布里渊光时域分析(BOTDA)技术<sup>[13]</sup>和布里渊光相关域分析(BOCDA)技术<sup>[14]</sup>。BOTDA 系统利用脉冲光源实现光纤沿线 SBS 的激励与定位,传感长度很容易达到 30 km<sup>[15]</sup>,通过脉冲编码<sup>[16-19]</sup>、时分/频分复用<sup>[20-23]</sup>、分布式放大<sup>[24-26]</sup>等方案可将传感距离拓展至 150 km 以上;进一步地,为了突破 10 ns 声子寿命对空间分辨率的限制, $\pi$ 脉冲<sup>[27-28]</sup>、差分脉冲对<sup>[29]</sup>、暗脉冲<sup>[30]</sup>等方案相继被提出,空间分辨率可突破至 cm 量级。同时,一种更易于实现 cm 级空间分辨率的 BOCDA 技术被提出<sup>[31]</sup>,该类技术采用正弦频率调制(Sine-FM)<sup>[32]</sup>、相位编码(Phase-coded)<sup>[33]</sup>、放大自发辐射(ASE)<sup>[34]</sup>等低相干光源,将 SBS 作用限制在光纤特定位置的超窄相关峰内,具有独特的高空间分辨率和随机寻址特性,可实现光纤沿线任意位置的选择性访问与监测。目前,研究者们已在空间分辨率、传感距离和测量速度等方面提出了多项创新 BOCDA 方案。

BOCDA 的空间分辨率取决于相关峰的半峰全宽(FWHM)。Sine-FM 系统中,相关峰宽度反比于光源调制频率和调制幅度,而 Phase-coded 系统中则反比于随机序列码率。Hotate 等<sup>[35]</sup>利用推挽型电流调制三段式激光器将光源调制幅度拓展至 33 GHz,空间分辨率突破至 1.6 mm;Ba 等<sup>[36]</sup>提出相移键控(PSK)型 Phase-coded BOCDA 大幅抑制非完美相位编码引起的噪声 SBS 放大效应,实现空间分辨率为 2 mm 的分布式传感;Matsumoto 等<sup>[37]</sup>提出一种基于短脉冲光源的 Phase-coded BOCDA,使用低占空

比的归零随机短脉冲将空间分辨率最高突破至 0.64 mm;Zarifi 等<sup>[38]</sup>充分发挥 ASE 光源的带宽优势,实验中利用线宽 80 GHz 的 ASE 信号在 5 cm 硫化物波导上实现了 0.8 mm 空间分辨率的测量。

此外,无论正弦调频或随机序列编码,原始信号的周期特性导致光纤中存有一系列离散的周期相关峰,限制了传感距离的进一步提升。因此,研究者们提出多种时分复用方案,利用单次泵浦脉冲传播中顺序产生的时域非重叠相关峰,实现多重传感点的同时访问<sup>[39-45]</sup>。基于此,Thévenaz 等<sup>[42]</sup>将 Phase-coded 系统的传感距离拓展至 17.5 km,空间分辨率仍保持 8.3 mm;Song 等<sup>[45]</sup>将差分测量、分布式拉曼放大补偿等方案同步应用至时分复用装置中,将 Sine-FM 系统传感距离提升至 52.1 km。

BOCDA 系统的测量时间主要包括系统定位时间和频率扫描时间,系统定位时间即以空间分辨率的步进扫描相邻相关峰间隔距离所耗费的时间,频率扫描时间是指探测光频率扫描匹配泵浦光频移解调布里渊增益谱(BGS)所耗费的时间,研究者们从这两个方面提出多项改进方案。例如,Shlomi 等<sup>[43]</sup>利用差分脉冲对来缩短相邻相关峰的间隔,仅需 11 次位置扫描即可实现全光纤 1600 个分辨点的分布式测量。Wang 等<sup>[46]</sup>利用压控振荡器高速扫描与位置自动扫描相结合,实现单点振动频率 20 kHz、光纤沿线 200 Hz 的动态应变测量;此外,该团队还提出斜坡辅助型 BOCDA<sup>[47]</sup>,进一步免除了耗时的频率扫描过程从而提升了系统的测量速度。

综上所述,研究者们志在实现长传感距离与高空间分辨率兼顾的快速 BOCDA 分布式光纤传感。基于此,本团队提出基于混沌激光的 BOCDA (chaotic BOCDA)技术<sup>[48-57]</sup>,利用混沌激光的类噪声、宽频谱、宽光谱特性实现长距离、高空间分辨率的温度、应变、振动监测。

## 2 基本原理

### 2.1 Chaotic BOCDA 的传感机理

混沌激光是半导体激光器受到扰动时在特定条件下输出的一种激光状态,此时其光强、相位在时域上不再是稳态,而是类似噪声的随机变化;激光器的动态特性仍可由速率方程描述,但因对初始条件极度敏感使得其输出是随机变化的<sup>[58]</sup>。目前,混沌激光的典型产生方式包括光反馈、光注入和光

电反馈等<sup>[58]</sup>。其中,光反馈法是最简单、最稳定的混沌激光产生方式,也是目前 chaotic BOCDA 系统所采用的混沌激光源产生方式。Chaotic BOCDA 采用的单反馈环外腔混沌激光产生装置图如图 1(a)所示,无内置隔离器的分布式反馈半导体激光器(DFB-LD)输出的单频激光经光环行器(OC)

注入单反馈环路,通过光衰减器(VOA)和偏振控制器(PC)分别调节反馈光的功率大小和偏振状态,DFB-LD 被驱动进入混沌状态。在此过程中,可以通过调节光反馈强度和偏振状态对混沌状态进行调节和优化;其中,光反馈强度定义为反馈光功率与激光器自身输出光功率的比值。

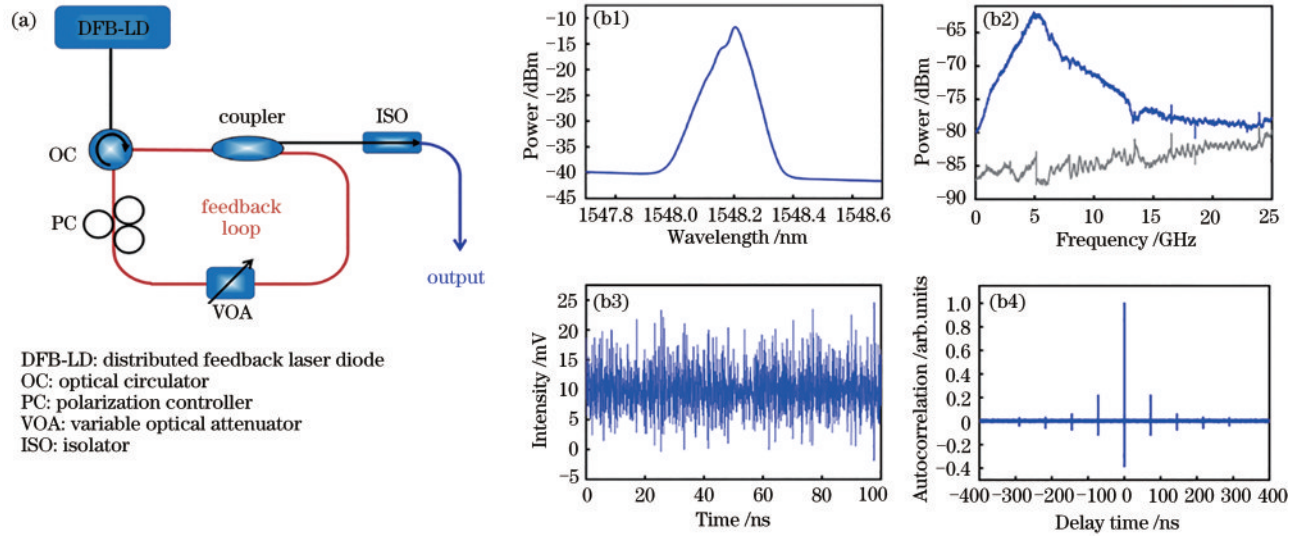


图 1 混沌激光光源及其输出特性。(a)单反馈环外腔混沌激光源;(b1)光谱;(b2)射频谱;(b3)时序;(b4)自相关曲线  
 Fig. 1 Chaotic laser source and its output characteristics. (a) Single feedback loop external cavity chaotic laser source; (b1) optical spectrum; (b2) radio frequency spectrum; (b3) time sequence; (b4) autocorrelation curve

混沌激光特性如图 1(b1)~图 1(b4)所示。图 1(b1)是混沌激光的光谱,与一般连续激光相比,混沌激光呈现宽光谱、低相干特性,主要光频成分的分布基本符合高斯线型。图 1(b2)是对应的混沌激光射频谱,覆盖范围超过 10 GHz,也具有宽带特性。图 1(b3)为混沌激光时序,表现为大幅度、无规则的振荡状态,振荡幅度远大于噪声,呈现类噪声特性。图 1(b4)是时序长度为 400 ns 的混沌激光的自相关曲线,表现为类  $\delta$  函数,且中心峰宽度与频谱带宽相关;然而,单反馈环外腔装置产生的混沌激光具有一定的周期性,表征为自相关曲线中心峰两侧的一系列周期性旁瓣峰,周期等于外腔反馈时间,称之为时延特征(TDS)。

三者之间相互耦合、SBS 效应被不断增强,最终达到稳定状态。当满足 SBS 相位匹配条件时,即  $\nu = \nu_B$  ( $\nu_B$  是光纤布里渊频移),SBS 效应最强<sup>[59]</sup>。

与连续激光类似,chaotic BOCDA 中激发的 SBS 效应可用如下的三波耦合方程描述<sup>[59]</sup>

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{V_g} \frac{\partial A_p}{\partial t} = \frac{i\pi\gamma_e}{2n\lambda\rho_0} \rho A_s, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{V_g} \frac{\partial A_s}{\partial t} = \frac{i\pi\gamma_e}{2n\lambda\rho_0} \rho^* A_p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\Gamma_B}{2} - i\Gamma'\right)\rho = \frac{\pi n \epsilon_0 \gamma_e}{4\lambda V_a} A_p A_s^*, \quad (3)$$

式中,  $A_p$ 、 $A_s$ 、 $\rho$  分别表示泵浦光、Stokes 光和声波场缓慢变化的复振幅,三者均为时间  $t$  和位置  $z$  的函数;  $V_g$  是光在光纤中的群速度,  $V_a$  是光纤中的声速,  $\epsilon_0$  是自由空间的介电常数,  $\gamma_e$  是电致伸缩常数,  $n$  是光纤折射率,  $\rho_0$  是介质平均密度,以上各项均只和光纤材料有关;  $\lambda$  是泵浦光的波长,  $\Gamma_B = 1/\tau$  是布里渊线宽 ( $\tau$  是布里渊声子寿命), 频率相对失谐量  $\Gamma' = 2\pi(\nu - \nu_B)$  在  $\nu = \nu_B$  时为 0。求解(1)式~(3)式,可得 SBS 声波场强度均值  $\overline{Q(z,t)}$ <sup>[50]</sup>

激光注入待测光纤(FUT)时,光纤中会产生瑞利、拉曼、布里渊等多种散射光,BOCDA 技术是一种基于 SBS 放大效应的分布式光纤传感技术<sup>[14]</sup>。SBS 放大效应可以描述为相向传输、频差为  $\nu$  的泵浦光和斯托克斯(Stokes)光通过声波场耦合的非线性相互作用,最终表征为泵浦光将能量转移给 Stokes 光,被放大的 Stokes 光激励出更强的声波场,

$$\overline{Q(z, t)} = j\gamma_e \int_0^t \exp[-\Gamma(t-t')] A_p \left( t' - \frac{z}{V_g} \right) A_s^* \left[ t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z) \right] dt', \quad (4)$$

$$C\langle \theta(z) \rangle = A_p \left( t' - \frac{z}{V_g} \right) A_s^* \left[ t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z) \right], \quad (5)$$

在这里假设 FUT 长度为  $L$ ,  $\Gamma = \Gamma_B/2 - i\Gamma'$ , 泵浦光和 Stokes 光从光纤两端相向入射, 如图 2(a) 所示, 有效的 SBS 声波场被限制在由两束光自相关函数  $C\langle \theta(z) \rangle$  决定的范围内; 其中,  $\theta(z) = (2z - L)/V_g$  是与位置相关的时间偏移量。由于混沌激光的类  $\delta$  函数特征, 易得 chaotic BOCDA 系统的 SBS 声波场被限制在自相关曲线决定的相关峰内, 相关峰 FWHM 决定了被激励声波场的空间范围, 即空间分辨率, 其表达式为

$$\Delta z = \frac{1}{2} V_g \Delta \tau, \quad (6)$$

其中,  $\Delta \tau$  是相关峰的 FWHM, 且与混沌带宽成反比, 即混沌带宽越宽、相关峰越窄, 系统空间分辨率就越高。另外, BOCDA 系统的传感距离可统一表示为

$$L = \frac{1}{2} V_g T, \quad (7)$$

式中,  $T$  是相关信号的周期, 类噪声、无周期的混沌激光系统从理论上可实现任意长度的传感距离。因此, 混沌激光的宽带、类噪声特性保证了任意长度光纤内存在唯一、窄带的相关峰, 原理上解决了测量距离和空间分辨率无法兼顾的矛盾。唯一的相关峰位于 FUT 的中心位置  $\theta(z/2) = 0$  处 (泵浦光和 Stokes 光的光程相等), 通过调节可变光延迟线改变 FUT 中相关峰的位置便可实现对整条光纤的扫描。仿真的 100 m 长的光纤中混沌 SBS 声波场强度的时间-空间分布图如图 2(b) 所示, 与 BOTDA 中时空一一对应的声波场分布不同, chaotic BOCDA 系统的声波场是位置确定、时间连续的, 即特定位置 (相关峰处) 的声波场可被持续激励, 激励时间与声波场时域宽度无关; 因此, 该方案可突破声子寿命的限制将空间分辨率突破至 cm 量级, 甚至 mm 量级。

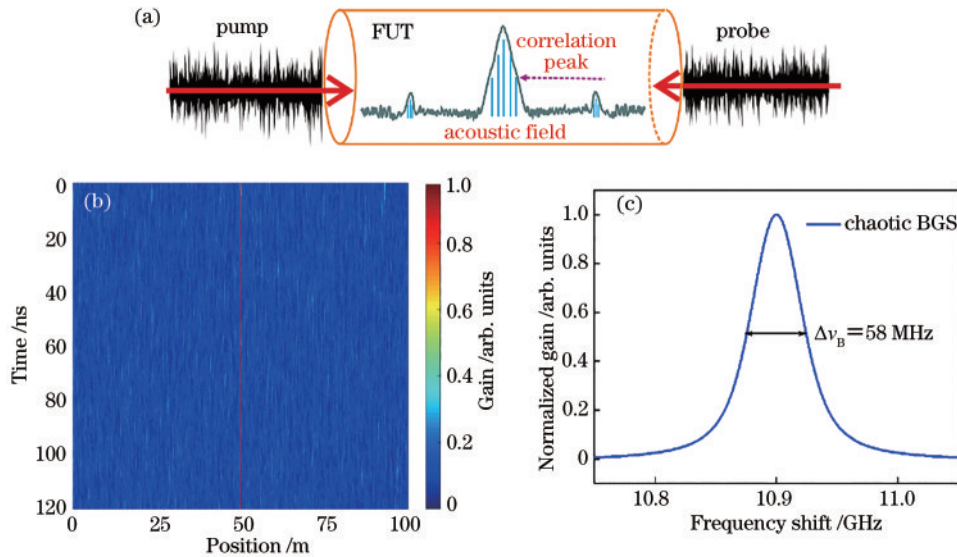


图 2 Chaotic BOCDA 工作原理。(a) 原理示意图; (b) 仿真的 100 m 长的光纤中混沌 SBS 声波场强度的时间-空间分布图; (c) 仿真的混沌布里渊增益谱

Fig. 2 Working principle of chaotic BOCDA. (a) Schematic illustration of principle; (b) simulation of time-space distribution of chaotic SBS acoustic field in 100 m-long fiber; (c) simulation of chaotic Brillouin gain spectrum

混沌 Stokes 光在 FUT 中传播时会经历 SBS 声波场增益, 增益函数  $g(\nu)$  可表示为<sup>[54]</sup>

$$g(\nu) = \int \rho_b(\omega) \frac{g_B |A_p|^2 \Delta \nu_B^2}{\Delta \nu_B^2 + 4(\nu - \nu_B - \omega)^2} d\omega, \quad (8)$$

式中,  $g_B$  是布里渊增益系数,  $\Delta \nu_B$  是布里渊增益自然线宽 ( $\Gamma_B = 2\pi\Delta \nu_B$ );  $\omega$  是泵浦光-Stokes 光的拍频率范围,  $\rho_b(\omega)$  是该拍频场的功率谱密度。由于

$$S_b = \rho_b(\Delta \nu), \quad (9)$$

$$G_1 = \frac{g_B |A_p|^2 \Delta\nu_B^2}{\Delta\nu_B^2 + 4(\Delta\nu)^2}, \quad (10)$$

式中,  $S_b$  是泵浦光-Stokes 光的拍频谱,  $\Delta\nu = \nu - \nu_B$ ,  $G_1$  是光纤中本征的布里渊增益谱(BGS)。因此, (8)式可修正为

$$f_{BGS} = S_b \otimes G_1, \quad (11)$$

式中,  $f_{BGS}$  是测得的混沌布里渊增益谱,  $\otimes$  表示卷积运算。因此, Stokes 光在 FUT 中传播时经历的增益函数(即实验测得的混沌 BGS)实际上可表征为本征增益谱和泵浦光-Stokes 光拍频谱的卷积<sup>[14]</sup>。

具体地, 在泵浦光与 Stokes 光极度相关位置处, 拍频谱是有关于频率的类  $\delta$  函数, 当改变泵浦光与 Stokes 光之间的频率差使拍频谱在  $\nu_B$  附近移动时, 相关峰处所产生的增益会依照此处的 BGS 变化并等效地反映在光纤输出端的 Stokes 光功率变化上; 相反, 在相关峰之外的其他地方, 非相干的拍频谱被展宽, 此时再移动拍频谱时, 探测光的增益很小且近乎常数。仿真的混沌 BGS 如图 2(c) 所示, 混沌激光的宽光谱特性决定了混沌泵浦光-Stokes 光的拍频谱仍保持宽带特征, 因此最终测得的混沌 BGS 应呈现宽谱特性, 当混沌光谱 -3 dB 线宽为 5 GHz 时, 仿真的混沌 BGS 谱宽可达 58 MHz。

### 2.2 Chaotic BOCDA 的概念验证

2018 年, 本课题组<sup>[49]</sup>提出 chaotic BOCDA 系统, 概念验证实验装置如图 3 所示。经光隔离器

(ISO) 输出的混沌激光由 20/80 光耦合器分为两路, 其中, 上支路(80%)作为探测光, 下支路(20%)作为泵浦光。探测光经微波信号源(MWG)驱动的电光调制器(EOM)调制为载波抑制的双边带模式, 边带频移量约等于  $\nu_B$ ; 然后依次经过可编程光延迟发生器(PODG)、掺铒光纤放大器(EDFA)、扰偏器(PS), 最后通过 ISO 注入 FUT 末端。其中 PODG 用于调节两路光光程差以实现相关峰的定位与扫描, EDFA 补偿探测光功率, PS 降低布里渊增益波动影响。泵浦光由高功率 EDFA 放大后通过 OC 输入到 FUT 前端, 与探测光在 FUT 中发生 SBS 作用, 被放大的探测光经 OC 输出经带通滤波器(BPF)后只保留 Stokes 分量。最后, 使用光谱仪(OSA)实时监测 Stokes 光谱变化, 使用光功率计(OPM)采集并分析 Stokes 光功率信息、解调混沌 BGS。本实验 FUT 设置如图 3 中插图所示, 包含 906 m 长的 G. 655 型普通单模光纤(SMF), 其中末端 883.8 m 处约 1.03 m 长的光纤段置于恒温箱内。本装置中的 PODG 由两个可编程光延迟线组成, 其中, 0~20 km 延迟范围、5 m 延迟步进的大范围光延迟线用于光纤位置的粗测定位; 0~168 mm 延迟范围、最高 0.001 mm 延迟步进的高精度光延迟线用于空间分辨率的精确测量。

由 2.1 节可知, chaotic BOCDA 是利用 BGS 实现光纤沿线温度或应变测量的, 因此首先测量了不同位置处的 BGS, 如图 4 所示。FUT 的不同位置处

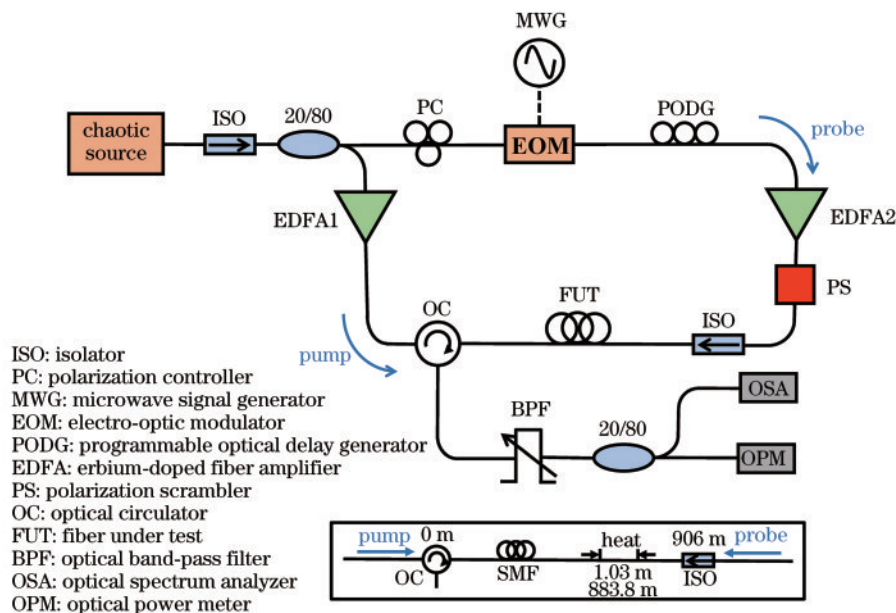


图 3 混沌布里渊光相关域分析技术实验装置图

Fig. 3 Experimental setup diagram of chaotic Brillouin optical correlation-domain analysis technology

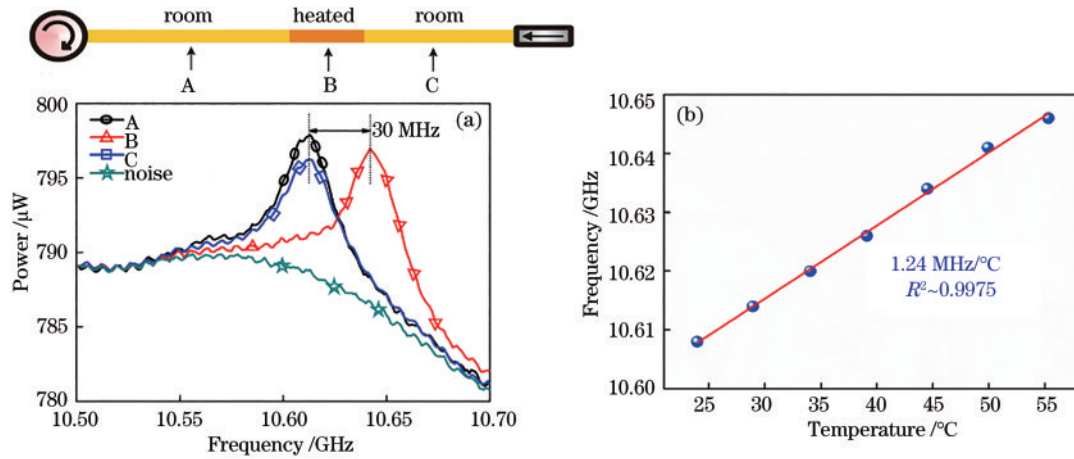


图4 混沌BGS解调温度。(a)不同位置、不同温度下测得的BGS;(b)BFS与温度的线性关系

Fig. 4 Temperature demodulation by chaotic BGS. (a) Measured BGSs at different positions and temperatures; (b) linear relationship between BFS and temperature

设置 A、B、C 三个测量点,其中,A 点和 C 点分别位于光纤前端和光纤末端,且两点均置于室温下,B 点放置于加热区;通过调节 PODG 实现三个测量点的准确定位,并利用 MWG 扫频、OPM 采集完成不同位置 BGS 的测量。测试环境室温保持约 25 °C,加热区温度约 50 °C,图 4(a)中可以看出 BGS 清晰识别到 30 MHz 的频移量,增益随距离增加呈下降趋势;此外,调节 PODG 将相关峰移出 FUT,测得系统的噪声增益基底,差分测量即可得到纯净的布里渊增益信号。基于此,本实验将加热区以 5 °C 的步进设置为不同的温度,分别测量其 BGS 并解调中心频率;温度与布里渊频移(BFS)的散点分布图及线性拟合结果如图 4(b)所示,相关系数为 0.9975 表明温度与 BFS 之间具有良好的线性关系,温度系数为 1.24 MHz/°C。

合理调节 PODG 可使系统中唯一的相关峰扫描

过整个 FUT,结合探测光扫频测量增益谱,图 5 所示即为光纤沿线分布式温度传感结果。图 5(a)可清晰观察到 FUT 末端的加热区,实验中,加热区设置为 55 °C,其余位置保持室温 25 °C。图 5(b)描述了 FUT 沿线的 BFS 分布式测量结果,插图是加热区 BFS 的放大图,可得频移量约为 37 MHz,与 30 °C 的温度变化相匹配。Chaotic BOCDA 系统的空间分辨率利用频移段上升沿和下降沿 10%~90% 区域对应长度的平均值来表征,因此可得本系统的空间分辨率约为 4 cm。需要指出,chaotic BOCDA 采用 PODG 实现逐点扫描、分布式定位。首先,以较大的采样间隔对加热区域进行粗测定位;然后,以较小的采样间隔寻找上升沿与下降沿;最后,以小于理论空间分辨率的采样间隔精确捕捉上升沿与下降沿的范围,从而测得准确的空间分辨率。因此,如图 5(b)所示,加热区域与非加热区域的采样点间隔均不同。

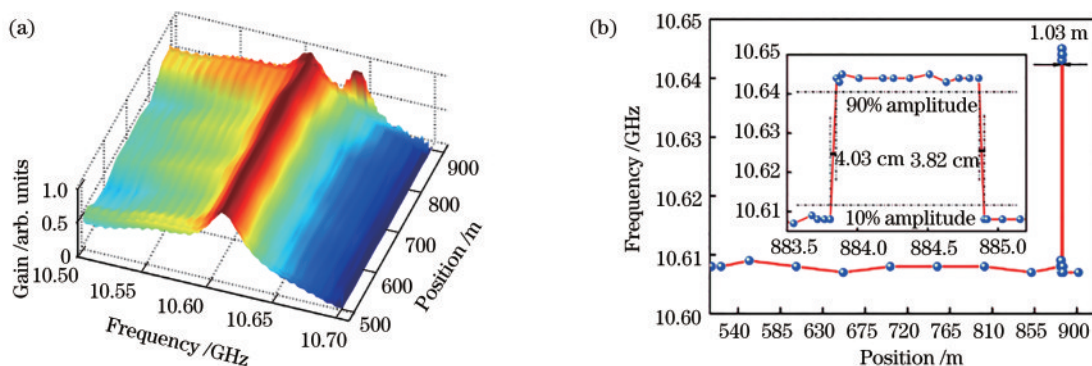


图5 分布式温度测量结果<sup>[49]</sup>。(a)FUT沿线的混沌BGS分布;(b)FUT沿线的BFS分布

Fig. 5 Results of distributed temperature measurement<sup>[49]</sup>. (a) Chaotic BGS distribution along the FUT; (b) BFS distribution along the FUT

### 3 发展历程

#### 3.1 拓展传感距离

上述概念验证实验中,混沌激光时延特征(TDS)造成的自相关函数旁瓣峰和混沌自相关曲线的非零均值,均会激发微弱的峰外SBS声波场,进而会在chaotic BOCDA系统中引入额外的噪声机制。噪声场随光纤长度增加而不断累积,系统信噪比(SNR)持续恶化,传感距离严重受限。因此,本团队提出两步法抑制系统背景噪声,进而实现传感距离的拓展。

实际上,旁瓣峰激发的噪声声波场强度与TDS值(用自相关系数值 $C$ 表示)相关,TDS越大,噪声峰强度越大,声波场SNR恶化越严重。Chaotic BOCDA采用的外腔单反馈混沌激光源是典型的具有固定反馈面和反馈腔长的延时光反馈结构,通过优化混沌半导体激光器的偏置电流和反馈强度即可实现对混沌激光TDS的抑制。不同注入电流和反馈强度下TDS位置处自相关系数的分布状态如图6

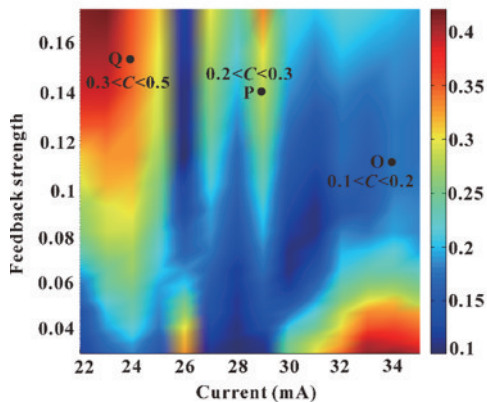


图6 在不同的注入电流和反馈强度下,外腔反馈时延处的自相关系数分布图<sup>[50]</sup>

Fig. 6 Distribution map of autocorrelation coefficient at external cavity feedback delay position under different injection currents and feedback strengths<sup>[50]</sup>

所示,本实验所使用的混沌激光源外腔反馈长度约为11.5 m,相应的外部反馈延迟时间为115 ns。由图易得,混沌激光TDS分布大致可以分为O、P、Q三个区域,即 $0.1 < C < 0.2$ ,  $0.2 < C < 0.3$ 和 $0.3 < C < 0.5$ 。明显地,TDS抑制区(O区, $0.1 < C < 0.2$ )占很大的面积比例,此时注入电流大小约为DFB激光器阈值电流的1.45~1.55倍,反馈强度为0.1~0.15。

然而,上述方法并不能完全消除混沌激光TDS,最大抑制效果时仍有0.179的旁瓣峰值,因此,TDS抑制chaotic BOCDA系统的传感距离最终被限制在3.2 km,空间分辨率保持在 $7 \text{ cm}^{[50]}$ 。为了进一步抑制FUT中的噪声增益,本课题组继续提出时域门控方案。

时域门控型chaotic BOCDA原理如图7(a)所示,连续混沌泵浦光被脉冲信号on-off强度调制为脉冲混沌激光,由于脉冲函数0/1开关系数,混沌探测光仅与脉冲持续时间等长的混沌泵浦光发生相关作用,其余时间均置0,相关峰被限制在脉冲持续时间内。通过选择合适的脉宽,混沌时延位置处的旁瓣峰值可置0;且泵浦光与探测光互相关作用的积分函数时间被缩短,混沌固有振荡均值也无限接近于0,系统中非相干声波场强度被抑制,即系统噪声基底被抑制。理论上讲,时域门控方案可完全消除混沌激光TDS和自相关非零基底引入的受激布里渊噪声声波场,然而实验中不存在完美的0/1型脉冲强度调制,系统噪声抑制效果与脉冲调制消光比(ER)直接相关。本实验中采用EOM实现脉冲强度调制,如图7(b)所示,设置其射频输入电压为3.5 V可得该系统的最佳ER为24.3 dB;混沌激光源的外腔时延约为123.8 ns,因此最佳脉冲宽度约为120 ns,此时脉冲信号将中心峰声波场充分激发且混沌旁瓣等非中心峰位置SBS作用被抑制,噪声累积达到最小水平。

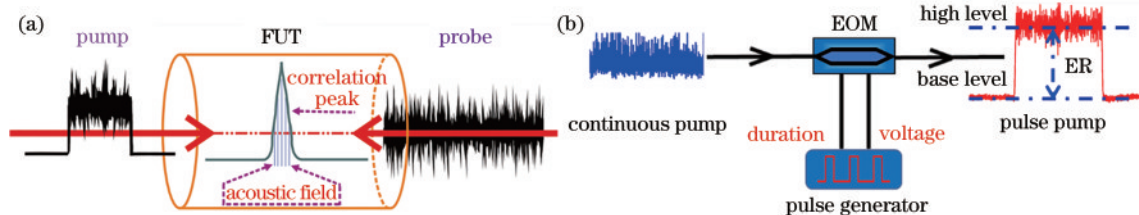


图7 时域门控系统示意图。(a)技术原理;(b)实验装置

Fig. 7 Schematic diagram of time-gated system. (a) Technical principle; (b) experimental setup

为了验证噪声抑制效果,比较了时域门控前后 chaotic BOCDA 系统测得的 BGS 及其信号背景噪声比 (SBR)。图 8(a)~图 8(c) 分别为光纤位置 5.0、8.5、10.0 km 处利用不同装置测量的 BGS,易得常规 chaotic BOCDA 系统噪声基底随光纤长度增加而逐渐升高;相反,在时域门控系统中,噪声基底始终维持在一个较低的水平。当光纤长度超过 10 km 时,常规系统中的 SBR 值已小于 1.00 dB,时域门控系统中仍保持 2.44 dB,增益峰明显高于噪

声峰。采用时域门控装置,整条 FUT 沿线的 SBR 得到大幅提升,如图 8(d) 所示,光纤末端 SBR 增量仍可达 1.48 dB。当传感光纤长度超过 8.0 km 时,常规系统的 SBR 几乎恒定在 1.00 dB,意味着布里渊增益信号已被非峰值放大所诱发的背景噪声基底所淹没;然而,当传感光纤达到 10 km 时,时域门控方案仍可以准确提取 BFS 信号,最终系统传感距离最远拓展至 10.2 km,系统空间分辨率保持为 9 cm<sup>[51]</sup>。

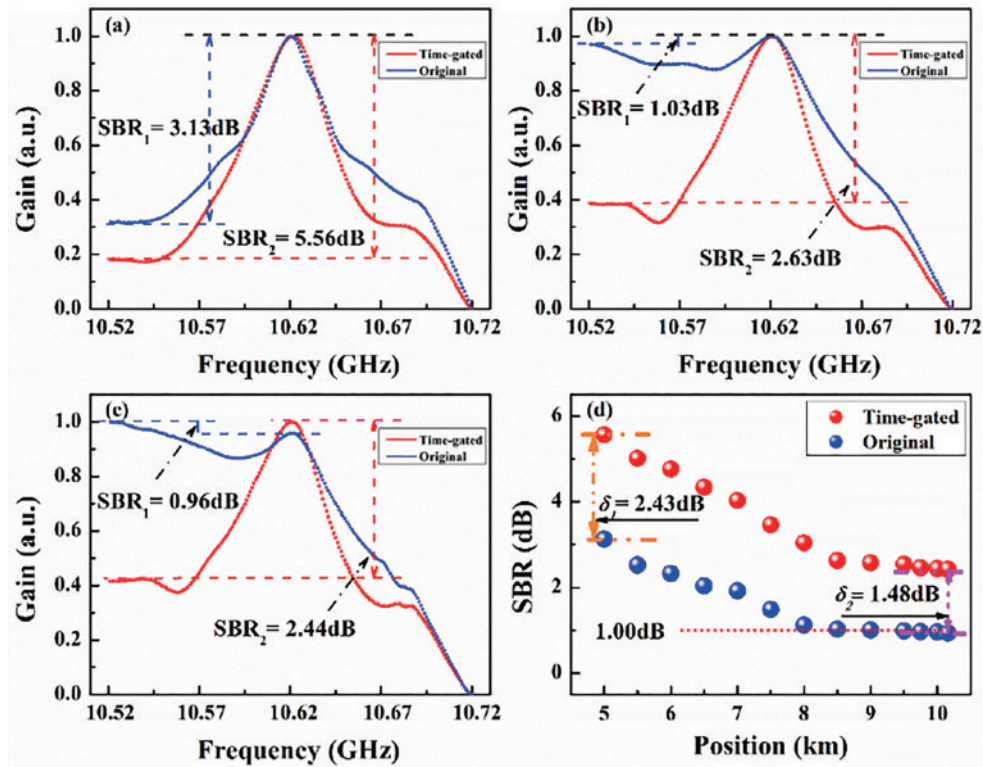


图 8 采用时域门控方案前后, chaotic BOCDA 系统在不同光纤距离处的 BGS 对比<sup>[51]</sup>。(a) 5.0 km; (b) 8.5 km; (c) 10.0 km; (d) SBR 与光纤位置的函数关系

Fig. 8 BGS comparisons of chaotic BOCDA systems with and without time-gated scheme at different fiber positions<sup>[51]</sup>.

### 3.2 提高空间分辨率

前述已知, chaotic BOCDA 系统中,仅在混沌自相关中心峰内激发产生布里渊声波场,即空间分辨率取决于中心峰的 FWHM;此外,中心峰的宽度与混沌带宽成反比,带宽越宽,中心峰越窄;因此, chaotic BOCDA 系统混沌带宽越宽,理论空间分辨率也越高。混沌激光带宽调谐过程中的三种典型混沌状态及其自相关特性分析如图 9 所示。通过选择合适的反馈强度、匹配反馈光与输出光的偏振状态,混沌—3 dB 带宽从 3 GHz 展宽至 10 GHz,自相关曲线中心峰逐渐被压缩,最终在 10 GHz 带宽混沌

中得到 FWHM 为 0.03 ns 的中心峰,理论空间分辨率可达 3 mm。

然而,宽带混沌泵浦光和探测光在光纤中作用产生的相关峰变窄,光纤中激发的微弱 SBS 增益信号极易被噪声淹没,严重影响系统性能。因此,在 mm 级空间分辨率 chaotic BOCDA 系统中引入锁相放大器 (LIA) 探测方案,混沌泵浦光被正弦信号时域门控调制,混沌信号非峰值放大引起的噪声被有效抑制;同时,该正弦信号作为参考信号用于信号采集端口 SBS 增益的解调。如图 10 所示,测量并比较不同数据采集方式下宽带



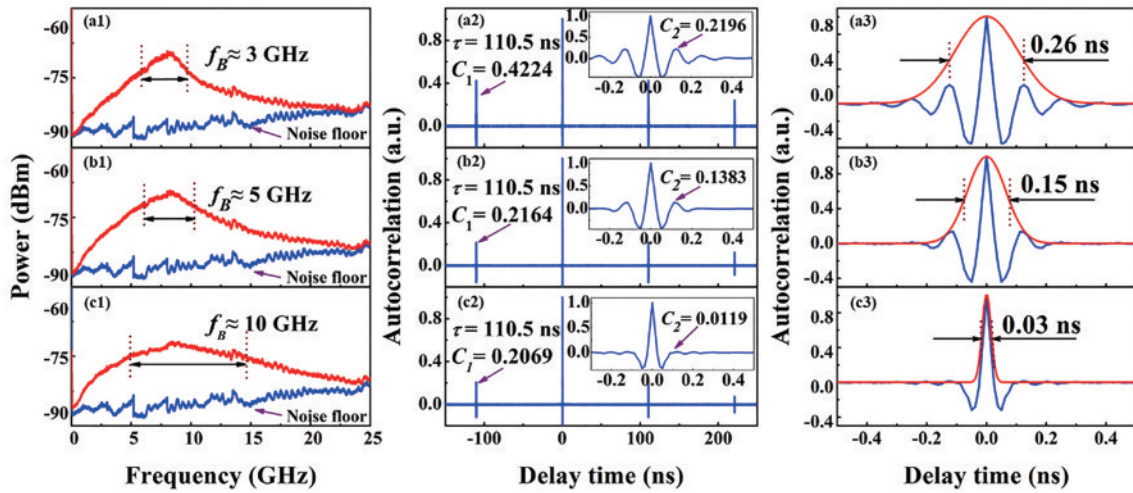


图9 混沌激光带宽调谐过程中的三种典型状态<sup>[52]</sup>。(a1)~(c1)射频谱;(a2)~(c2)自相关曲线;(a3)~(c3)自相关中心峰及其高斯拟合曲线

Fig. 9 Typical status of chaotic laser in bandwidth adjustment process<sup>[52]</sup>. (a1)~(c1) Radio frequency spectra; (a2)~(c2) autocorrelation traces; (a3)~(c3) autocorrelation center peaks and their Gaussian fitting curves

chaotic BOCDA 系统的 BGS。光纤长度约 165 m, 末端设置了 2000 με 的拉伸区, 由于系统 SNR 的显著差异, 如图 10(a) 所示的 OPM 采集和如图 10(b) 所示的锁相探测解调得到的增益谱不论 SBR 或是 BFS 均明显不同。在锁相探测系统中,

BGS 的 SBR 值高达 6.33 dB, 频移约为 102 MHz, 与 100 MHz 的标准值相一致。然而, 在 OPM 采集的系统中, 95 MHz 的频移量明显与实际值相差较大; 尽管单次 BGS 测量均已平均 25 次, SBR 值仍仅 1.94 dB。

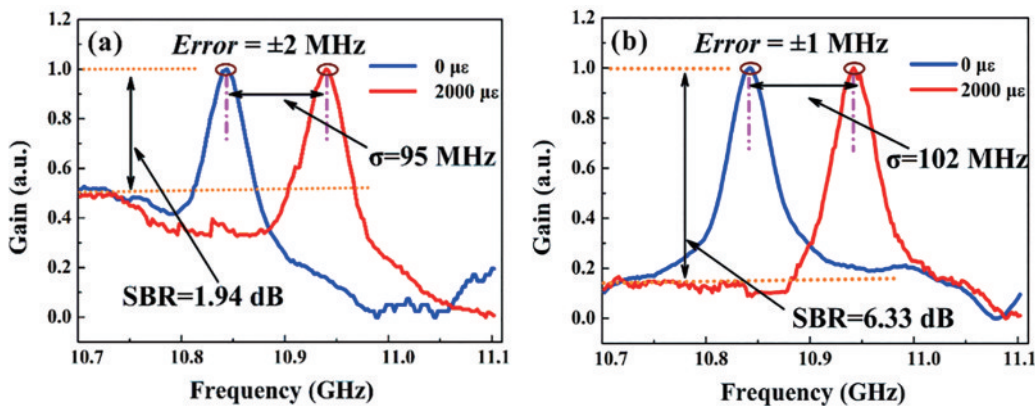


图 10 毫米级分辨率 chaotic BOCDA 系统不同数据采集方式下 BGS 对比图<sup>[52]</sup>。(a) OPM 方案; (b) LIA 方案

Fig. 10 Comparisons of BGS under different data acquisition methods in millimeter-level-spatial-resolution chaotic BOCDA system<sup>[52]</sup>. (a) OPM-based scheme; (b) LIA-based scheme

此外, 传统 OPM 采集系统中, OPM 积分时间约为 0.3 μs, 扫频范围是 10.7~11.1 GHz、扫频步进为 2 MHz, 单次测量约需 1 min; 为了保证高 SBR, 单个 BGS 的测量至少需平均 25 次, 信号接收总时长约为 25 min, 是一个非常耗时的过程, 且单个分辨率点中心频率的测量误差约为 ±2 MHz; 继续增加平均次数, BGS 无明显变化。LIA 采集系统中, 单个 BGS 以 1 kHz 采样率、10 μV 灵敏度进行采集, 单次测量仅耗时 0.2 s; 进一步地, 单个 BGS 测

量进行 15 次平均, 信号接收总时长仅约 3 s, 单点位置中心频率的测量误差仅 ±1 MHz; 与 OPM 系统类似, 继续增加测量时长, BGS 无明显改善。因此, 锁相探测方案不仅增强了系统测量的 SNR, 同时也大幅提升了系统的测量速度; 采用更高速的 MWG 扫频和数字实时示波器采样, 系统测量速度可以被进一步提升。需要指出, 混沌 BOCDA 可直接利用 Stokes 光输出功率实现增益谱解调, 因此, 本研究中 OPM 采集装置或者 LIA 采集装置, 均对接收端测

量系统的信号带宽无过大要求。

最后,进行系统空间分辨率的验证,FUT 沿线 BGS 的三维分布图如图 11(a)所示,应变区 BFS 明显改变。FUT 沿线 BFS 随应变变化的分布曲线如

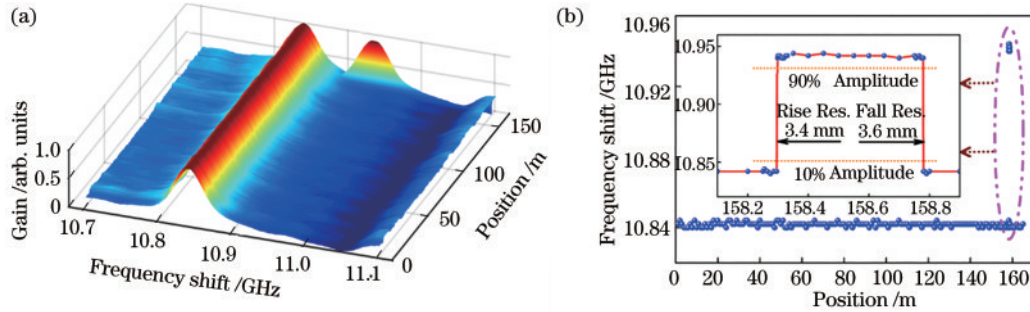


图 11 毫米级分辨率 chaotic BOCDA 系统分布式应变测量结果<sup>[52]</sup>。(a)沿 FUT 测得的 BGS;(b)沿 FUT 测得的 BFS 曲线  
Fig. 11 Results of distributed strain measurement in millimeter-level-spatial-resolution chaotic BOCDA system<sup>[52]</sup>. (a) BGS along the FUT; (b) BFS curve along the FUT

### 3.3 提升测量速度

尽管锁相探测方案极大提升了 chaotic BOCDA 系统的数据采集速度,然而,传统方案均需通过耗时的频率扫描过程使得探测光与泵浦光的频率失谐量匹配光纤 BFS 以激发有效的 SBS 作用,测得光纤沿线 BGS 并依其中心频率解调任意位置的温度、应变信息。因此,扫频型系统的动态实时性受到严峻挑战。

为满足现代传感网络对动态参量的实时监测

需求,本课题组提出单斜坡辅助 chaotic BOCDA 技术,利用本征展宽的混沌 BGS 实现大范围、高精度的动态应变监测<sup>[54-57]</sup>。如图 12(a)所示,单斜坡辅助技术将探测光频率固定在 BGS 上升沿或下降沿线性区的中点 $f_0$ ,纵向拉伸应变使 BGS 发生频移进而引起 $f_0$ 处探测光功率的变化,然后利用功率-应变转换系数从布里渊信号的强度变化中解调出所施加的应变信息,最终实现动态应变的实时解调<sup>[60]</sup>。

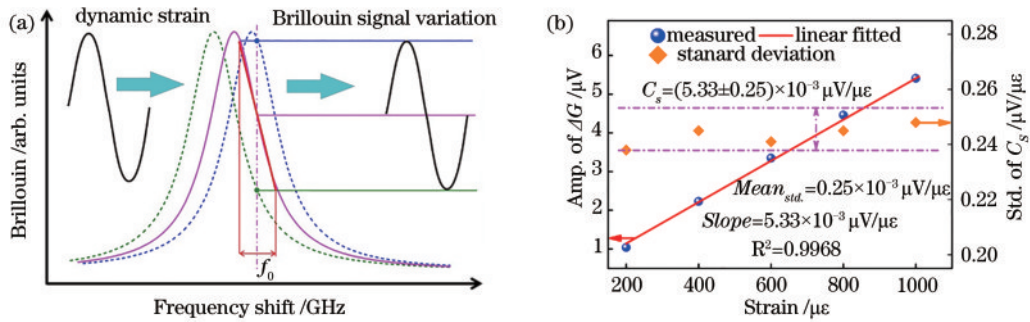


图 12 单斜坡辅助技术原理。(a)单斜坡辅助技术示意图;(b)布里渊功率-应变转换系数<sup>[54]</sup>  
Fig. 12 Principle of single-slope-assisted technology. (a) Schematic diagram of single-slope-assisted technology; (b) conversion coefficient between Brillouin amplitude and strain value<sup>[54]</sup>

提出并验证单斜坡辅助型 chaotic BOCDA (SSA-CBOCDA) 系统<sup>[54-55]</sup>。实验中,混沌激光光谱-3 dB 线宽为 5.60 GHz,待测光纤总长为 130 m,拉伸区约为 20 cm。实验测得混沌 BGS 的 FWHM 为 55 MHz,应变-频移系数约为 22  $\mu\epsilon$ /MHz,动态应变测量范围理论可达 1200  $\mu\epsilon$ ,同时确定了系统空间分辨率仍保持 3.45 cm。基于消除 TDS 次峰后的混

沌 BGS<sup>[49]</sup>,将探测光频率固定在 BGS 下降沿中心频率处,约 10.90 GHz,施加不同大小动态应变以测定功率-应变转换系数,如图 12(b)所示,应变大小与锁定频率下的布里渊增益强度变化呈线性关系;最终,功率-应变转换系数近似为  $(5.33 \pm 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{V}/\mu\epsilon$ 。

实验中,动态应变是由一对低速步进电机提

供的,电机拉伸速度和步进位移的变化将为动态应变提供不同的动态频率和应变大小。SSA-CBOCDA 系统中不同振幅和频率的动态应变测量结果如图 13 所示。图 13(a)中,频率为 4.67 Hz、振幅为 0~100  $\mu\epsilon$  的动态应变可以被精确识别,其测量时序几乎与正弦拟合曲线重合,系统的最小可测量应变小于 100  $\mu\epsilon$ 。在图 13(b)和图 13(c)中,当应变分别为 0~1000  $\mu\epsilon$  及 0~1200  $\mu\epsilon$  时,时序仍为

单峰,表明施加的应变在临界范围内。当施加应变范围为 0~1400  $\mu\epsilon$ ,如图 13(d)所示,时序上呈现双峰现象,超出单斜坡辅助测量范围;此外,增益双峰的波峰和波谷呈现大范围不规则振荡,并不能通过波峰-波谷值间隔  $\Delta S$  准确解调超量程动态应变。最终,实验结果表明 SSA-CBOCDA 最大动态应变范围可达 1200  $\mu\epsilon$ ,是传统 SSA 系统的 2 倍以上。

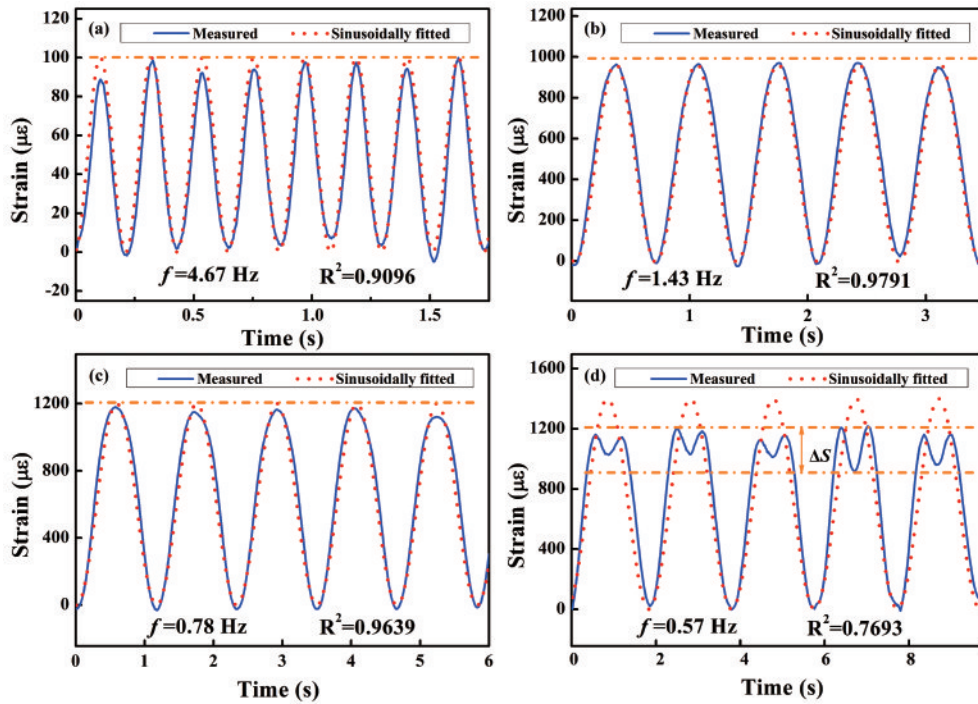


图 13 不同动态应变下时序及正弦拟合曲线<sup>[54]</sup>。(a) 0~100  $\mu\epsilon$ ; (b) 0~1000  $\mu\epsilon$ ; (c) 0~1200  $\mu\epsilon$ ; (d) 0~1400  $\mu\epsilon$   
 Fig. 13 Time traces and sine-fitted curves under different dynamic strains<sup>[54]</sup>. (a) 0~100  $\mu\epsilon$ ; (b) 0~1000  $\mu\epsilon$ ; (c) 0~1200  $\mu\epsilon$ ;

SSA-CBOCDA 技术摒弃了耗时的频率扫描过程而使得测量速度大幅提升,然而,混沌激光类噪声特性引起的泵浦光功率波动现象导致 SSA 系统动态应变测量精度较差。例如,当光纤处于无应变状态时,混沌激光本征波动造成的基准误差约为 40  $\mu\epsilon$ ;随着应变的逐渐增大,动态应变测量误差持续上升至 60  $\mu\epsilon$  左右;当测量范围达到 1200  $\mu\epsilon$  时,由于布里渊增益与应变大小的非线性响应,动态应变测量误差甚至达到 114  $\mu\epsilon$ <sup>[54]</sup>。

为了提高动态应变测量精度,本课题组继续提出双斜坡辅助型 chaotic BOCDA (DSA-CBOCDA) 技术<sup>[56-57]</sup>。SSA-CBOCDA 技术中,无论频率锁定在上升沿或下降沿,探测光增益均与泵浦光功率成正比,因此可得两个确定频率下的增益比仅与锁定频率下的增益大小有关,与泵浦光功率无关<sup>[61]</sup>。DSA-

CBOCDA 技术将探测光频率分别锁定在混沌 BGS 的上升沿与下降沿处,最终测得增益比-应变转换系数约为  $6.43 \times 10^{-4}$  dB/ $\mu\epsilon$ <sup>[57]</sup>。基于此,利用 DSA 技术分别测定了静态和动态的应变测量精度以及应变分辨率,如图 14 所示。图 14(a)中的振荡曲线为 DSA 技术解调的静态应变单次测量时序,可得此时测量精度为 4.8  $\mu\epsilon$ ;通过 15 次独立重复实验,最终测定静态应变精度为 3.9  $\mu\epsilon$ 。应变分辨率定义为系统可识别的最小应变差,理论值等于测量精度的 2 倍,图 14(b)实验测定了 DSA-CBOCDA 的静态应变分辨率,该系统准确区分了  $\pm 200.0 \mu\epsilon$  与  $\pm 210.0 \mu\epsilon$ ,应变分辨率可达 10  $\mu\epsilon$ 。随后,继续实验测量并验证 DSA-CBOCDA 的动态应变测量精度与应变分辨率。图 14(c)是施加  $\pm 300.0 \mu\epsilon$  时峰值处的单次测量结果,极大值与极小值的标准差分别为 7.1  $\mu\epsilon$  和

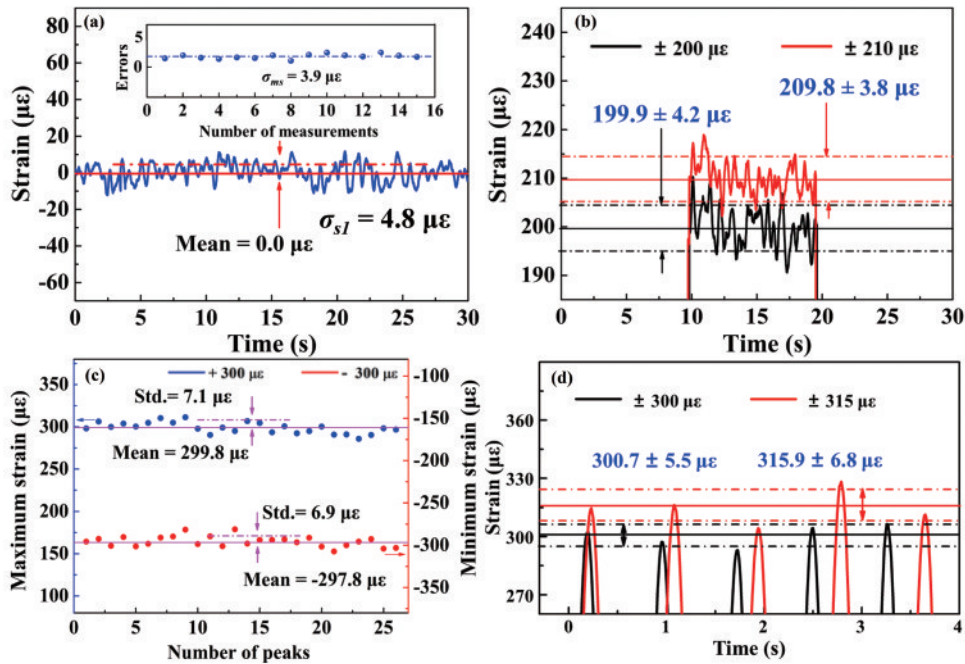


图 14 DSA-CBOCDA 系统测量结果<sup>[57]</sup>。(a)静态应变测量精度；(b)静态应变分辨率；(c)动态应变测量精度；(d)动态应变分辨率

Fig. 14 Measurement results of DSA-CBOCDA system<sup>[57]</sup>. (a) Measurement accuracy of static strain; (b) static strain resolution; (c) measurement accuracy of dynamic strain; (d) dynamic strain resolution

6.9  $\mu\epsilon$ ，此时动态应变测量精度约为 7.0  $\mu\epsilon$ ；通过 15 次独立重复实验，最终测定动态应变测量精度为 6.2  $\mu\epsilon$ 。同理，继续测定了该系统动态应变分辨率，如图 14(d) 所示， $\pm 300.0 \mu\epsilon$  与  $\pm 315.0 \mu\epsilon$  的动态应变被准确识别，动态应变分辨率可达 15  $\mu\epsilon$ <sup>[57]</sup>。此外，DSA 系统仍具有 800  $\mu\epsilon$  的大动态范围<sup>[56-57]</sup>。

斜坡辅助方案使得 chaotic BOCDA 系统的测量速度大幅提升，但是步进电机低速运动和 LIA 低采样率将动态应变频率限制在 Hz 量级，未来研究中将采用压电陶瓷振荡器来提供高频的动态应变以及高速数字示波器以进行实时的采样，将振动频率提升至 kHz 量级，进一步提升混沌传感系统的测量速度。此外，基于传统 BOCDA 定位测量原理，斜坡辅助型 chaotic BOCDA 仅实现了单点位置的动态应变测量，下一步将继续开发时域/相关域同步解调技术，实现光纤沿线振动参数的分布式检测。

## 4 分析与讨论

### 4.1 BOCDA 技术现状

目前，各类 BOCDA 技术已在空间分辨率、传感距离和测量速度方面取得一定的创新成果。表 1 展示了近年来各种 BOCDA 技术的主要研究进展和待

解决难题。

BOCDA 技术最独特的优势在于可实现 mm 级超高空间分辨率，由于正弦直流调制带宽、相位编码信号速率及调制器件带宽的限制，研究者们利用推挽型电流调制三段式激光器、相移键控技术、基于外腔锁模激光器的飞秒脉冲发生器等特殊调制器件和手段将空间分辨率最高突破至 0.64 mm<sup>[37]</sup>。然而，该类装置系统 SNR 严重下降，最长传感距离仅 5 m；此外，装置复杂、成本高昂，可操作性与实用性都受到了极大限制。

针对系统传感距离，在 Sine-FM 和 Phase-coded 系统中，为了有效提取并分离周期相关峰中的 SBS 增益，多个信号发生器、脉冲调制器被用于搭建时分复用网络，并利用分布式放大补偿，有效传感距离最远拓展至 52.1 km<sup>[45]</sup>；然而，系统成本和复杂度显著上升。为避免光纤非线性效应，该类光源系统的泵浦入射功率一般不超过 100 mW，进而进一步限制了传感距离的提升。

BOCDA 系统测量速度慢、耗时长是制约其未来发展的另一大难题。目前，Sine-FM BOCDA 利用快速扫频与自动定位相结合可实现单点位置最高为 20 kHz、分布式任意位置最高为 200 Hz 的动态应变监测，但是其传感距离和空间分辨率仍处于初

表 1 BOCDA 技术研究进展  
Table 1 Research progress of BOCDA

Category	Optimal results			Main drawback
	Spatial resolution at sensing range	Sensing range at spatial resolution	Measurement speed	
Sine-FM BOCDA	1.6 mm at 5 m <sup>[35]</sup>	52.1 km at 7 cm <sup>[45]</sup>	dynamic strain: 20 kHz <sup>[46]</sup>	bandwidth predicament; higher cost and complexity
Phase-coded BOCDA	0.64 mm at 2.8 m <sup>[37]</sup>	17.5 km at 8.3 mm <sup>[42]</sup>	localization: 185 points /s <sup>[43]</sup>	high-rate modulation; higher cost and complexity
ASE-based BOCDA	0.8 mm at 5 cm <sup>[38]</sup>	5 cm at 4 mm <sup>[34]</sup>	time consuming <sup>[34]</sup>	poor SNR and practicality; limited sensing range
Chaotic BOCDA	3.5 mm at 165 m <sup>[52]</sup>	10.2 km at 9 cm <sup>[51]</sup>	dynamic strain: ~5 Hz <sup>[54]</sup>	time consuming; inconvenient of positioning

级阶段(2018年, 8 cm at 20 m)<sup>[46]</sup>。Phased-coded 系统虽然可实现 185 Sa/s 的快速定位, 但仍未实现动态应变测量<sup>[43]</sup>。

综上所述, 为满足现代传感网络的重大需求, 未来 BOCDA 技术将继续向长距离精准定位和高精度实时监测方向迈进。

#### 4.2 Chaotic BOCDA 技术优势

Chaotic BOCDA 技术利用混沌激光独特的类噪声、宽频带、宽光谱特性, 成为长监测距离与高空间分辨率兼顾的传感优选方案, 并且可实现大范围、高精度的动态应变测量。与上述各类 BOCDA 技术相比, chaotic BOCDA 技术的优势主要体现在三个方面:

1) 易于实现更高的空间分辨率。混沌传感的空间分辨率取决于混沌激光带宽, 在之前的工作中<sup>[52]</sup>, 本课题组利用 -3 dB 带宽 10 GHz 的混沌激光获得了 3 mm 的理论空间分辨率, 实际测量值也达到了 3.5 mm。需要指出, 10 GHz 带宽的混沌激光很容易利用最简单的单反馈环结构产生, 无需任何复杂的调制手段和调制器件, 即可获得 mm 级空间分辨率, 且传感距离可扩展至上百米。此外, 本课题组已经利用双 DFB 光注入<sup>[62]</sup>、有源光反馈<sup>[63]</sup>等方式产生了 50 GHz 的带宽增强型混沌激光, 理论上可以实现亚毫米级的空间分辨率。

2) 易于实现更长的传感距离。在 Sine-FM 和 Phase-coded 系统中, 为了有效提取并分离周期性相关峰中携带的 SBS 增益, 研究人员需要利用多个信号发生器和调制器搭建时分复用网络, 例如文献<sup>[40]</sup>中, 用到了 4 个任意波形发生器和 2 个电光调制器, 系统成本和复杂度大幅上升。混沌激光的类

噪声特性保证了任意长度光纤中仅存在唯一的中心峰, 理想型 chaotic BOCDA 系统在任意长传感距离上不会受到噪声增益的干扰; 实际上, 文献<sup>[51]</sup>中, 将混沌激光 TDS 抑制之后即可实现传感距离的大幅拓展, 未来采用无时延混沌激光可使测量范围进一步提升。此外, 由于宽带混沌激光的光纤 SBS 阈值很高, 混沌泵浦光的入射光功率可以更高, 无需额外的在线 EDFA、分布式拉曼放大等补偿措施即有望实现超长距离传感。

3) 可实现距离无关的高空间分辨率传感。在 Sine-FM 和 Phase-coded 系统中, 周期性相关峰的扫描是通过调节正弦信号频率或随机序列码率实现的。因此, 系统定位过程中, 相关峰宽度也会发生微弱改变, 导致系统空间分辨率和定位精度被恶化; 尤其是长距离传感系统中, 光纤前端和光纤末端相关峰的阶数差距越大, 空间分辨率恶化越严重, 甚至出现定位盲区<sup>[40]</sup>。Chaotic BOCDA 系统中唯一的相关峰是通过电控可编程光延迟线实现光纤沿线定位的, 延迟精度远小于系统空间分辨率; 同时, 混沌系统的空间分辨率仅取决于混沌激光带宽, 并不会随定位距离而改变, 可实现全光纤等精度、无盲区的传感测量<sup>[52]</sup>。

现行 chaotic BOCDA 系统仍有明显的技术缺陷: 1) 混沌激光唯一相关峰的定位与扫描是一个相对耗时的过程, 是制约其距离拓展、仪器集成、工程实用的最大因素; 2) 目前系统采用的混沌激光源均由分立器件搭建而成, 不利于集成化、小型化、工程化的开发与应用。因此, 未来 chaotic BOCDA 技术将采用更加简单、轻便、易集成的光子集成混沌激光源<sup>[64]</sup>, 同时基于混沌光时域反射技术 (Chaos

OTDR)<sup>[65]</sup>以开发时域解调相关峰的方法,实现高效、快速、工程化的发展。

## 5 结 论

基于受激布里渊散射的BOCDA技术由于其独特的高空间分辨率优势而具有广泛的研究和应用前景。从chaotic BOCDA传感机理出发,分别综述了课题组在传感距离拓展、空间分辨率优化和测量速度提升方面的代表性工作,最终实现了10.2 km长传感距离、3.5 mm高空间分辨率和1200  $\mu\epsilon$ 大范围动态应变的传感测量。此外,还分类介绍了当前BOCDA技术的发展情况、对比了不同技术的优劣,尤其突出了chaotic BOCDA的技术优势。未来研究中,chaotic BOCDA技术将向着现代传感网络对长距离、高分辨率、快速实时的需求方向发展,并在土工结构健康、油气管网输送安全、边境安防等领域中实现工程应用。

### 参 考 文 献

- [1] Grattan K T V, Meggitt B T. Optical fiber sensor technology[M]. Boston: Springer, 1999.
- [2] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [3] Lu P, Lalam N, Badar M, et al. Distributed optical fiber sensing: review and perspective[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4): 041302.
- [4] Walter F, Gräff D, Lindner F, et al. Distributed acoustic sensing of microseismic sources and wave propagation in glaciated terrain[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2436.
- [5] Yang Z C, Feng Y F, Sang W B, et al. Application research on health monitoring of long bridge based on distributed optical fiber sensing[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2020, 9(5): 532-539.  
杨樟成, 冯亚非, 桑卫兵, 等. 基于分布式光纤传感的长大桥健康监测应用研究[J]. 土木工程, 2020, 9(5): 532-539.
- [6] Ba D X, Dong Y K. Distributed optical fiber sensor and its potential applications in health monitoring of aerospace structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 730-738.  
巴德欣, 董永康. 分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用展望[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 730-738.
- [7] Ren L, Jiang T, Jia Z G, et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology[J]. Measurement, 2018, 122: 57-65.
- [8] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.  
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001.
- [9] Bao X Y, Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [10] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [11] Zhao L J, Wang H Q, Xu Z N, et al. Analysis of factors affecting accuracy of Brillouin frequency shift extraction based on similarity matching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0506003.  
赵丽娟, 王贺晴, 徐志钮, 等. 基于相似匹配方法的光纤布里渊频移提取准确性影响因素分析[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0506003.
- [12] Wang T, Tian F, Tang W Q, et al. Brillouin frequency shift extraction method for distributed optical fiber temperature sensing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170631.  
王婷, 田凤, 汤文青, 等. 分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170631.
- [13] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [14] Hotate K, Hasegawa T. Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique: proposal, experiment and simulation[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2001, 84(3): 405-412.
- [15] Bao X, Webb D J, Jackson D A. 32-km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber[J]. Optics Letters, 1993, 18(18): 1561-1563.
- [16] 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.
- [17] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F, et al. Long-range Brillouin optical time-domain analysis sensor

- employing pulse coding techniques[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(9): 094024.
- [18] Soto M A, le Floch S, Thévenaz L. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16390-16397.
- [19] Yang Z S, Li Z L, Zaslowski S, et al. Design rules for optimizing unipolar coded Brillouin optical time-domain analyzers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16505-16523.
- [20] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 277-279.
- [21] 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.
- [22] Dong Y K, Wang B Z, Pang C, et al. 150 km fast BOTDA based on the optical chirp chain probe wave and Brillouin loss scheme[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4679-4682.
- [23] 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.
- [24] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, et al. Hybrid distributed Raman amplification combining random fiber laser based 2nd-order and low-noise LD based 1st-order pumping[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24611-24619.
- [25] Kim Y H, Song K Y. Tailored pump compensation for Brillouin optical time-domain analysis with distributed Brillouin amplification[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14098-14105.
- [26] Xu S R, Ma H L, Jia X H, et al. Long-distance vector Brillouin optical time-domain analysis sensors using distributed Brillouin amplification with frequency-comb pump parallel demodulation[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(11): 112004.
- [27] Foaleng S M, Tur M, Beugnot J C, et al. High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(20): 2993-3003.
- [28] Yang Z S, Hong X B, Lin W Q, et al. Evaluating and overcoming the impact of second echo in Brillouin echoes distributed sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1543-1558.
- [29] 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.
- [30] Brown A W, Colpitts B G, Brown K. Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 381-386.
- [31] Hu X X, Wang Y H, Zhao L, et al. Research progress in Brillouin optical correlation domain analysis technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0100001.  
胡鑫鑫, 王亚辉, 赵乐, 等. 布里渊光相干域分析技术研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0100001.
- [32] Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 700-719.
- [33] Zadok A, Antman Y, Primerov N, et al. Random-access distributed fiber sensing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): L1-L5.
- [34] Cohen R, London Y, Antman Y, et al. Brillouin optical correlation domain analysis with 4 millimeter resolution based on amplified spontaneous emission [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 12070-12078.
- [35] Song K Y, He Z Y, Hotate K. Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2526-2528.
- [36] Ba D X, Li Y, Yan J L, et al. Phase-coded Brillouin optical correlation domain analysis with 2-mm resolution based on phase-shift keying[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36197-36205.
- [37] Matsumoto M, Akai S. High-spatial-resolution Brillouin optical correlation domain analysis using short-pulse optical sources[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(24): 6007-6014.
- [38] Zarifi A, Stiller B, Merklein M, et al. Highly localized distributed Brillouin scattering response in a photonic integrated circuit[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(3): 036101.
- [39] Kim Y H, Lee K, Song K Y. Brillouin optical correlation domain analysis with more than 1 million effective sensing points based on differential measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33241-33248.
- [40] Ryu G, Kim G T, Song K Y, et al. Brillouin optical correlation domain analysis enhanced by time-domain data processing for concurrent interrogation of multiple sensing points[J]. *Journal of Lightwave Technology*,

- 2017, 35(24): 5311-5316.
- [41] Eloo D, Antman Y, Levanon N, et al. High-resolution long-reach distributed Brillouin sensing based on combined time-domain and correlation-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6453-6463.
- [42] Denisov A, Soto M A, Thévenaz L. Going beyond 1000000 resolved points in a Brillouin distributed fiber sensor: theoretical analysis and experimental demonstration[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16074.
- [43] Shlomi O, Preter E, Ba D X, et al. Double-pulse pair Brillouin optical correlation-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26867-26876.
- [44] London Y, Antman Y, Preter E, et al. Brillouin optical correlation domain analysis addressing 440000 resolution points[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4421-4429.
- [45] Ryu G, Kim G T, Song K Y, et al. 50 km-range Brillouin optical correlation domain analysis with first-order backward distributed Raman amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5199-5204.
- [46] Wang B, Fan X Y, Fu Y X, et al. Dynamic strain measurement with kHz-level repetition rate and centimeter-level spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6916-6928.
- [47] Wang B, Fan X Y, Fu Y X, et al. Distributed dynamic strain measurement based on dual-slope-assisted Brillouin optical correlation domain analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4573-4583.
- [48] Zhang M J, Wang Y C. Review on chaotic lasers and measurement applications[J/OL]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, DOI: [10.1109/JLT.2020.3043829](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3043829). (2020-11-10)[2021-02-17], <https://ieeexplore.ieee.org/document/9290365>.
- [49] Zhang J Z, Zhang M T, Zhang M J, et al. Chaotic Brillouin optical correlation-domain analysis[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1722-1725.
- [50] Zhang J Z, Feng C K, Zhang M J, et al. Brillouin optical correlation domain analysis based on chaotic laser with suppressed time delay signature[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6962-6972.
- [51] 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.
- [52] Wang Y H, Zhang M J, Zhang J Z, et al. Millimeter-level-spatial-resolution Brillouin optical correlation-domain analysis based on broadband chaotic laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3706-3712.
- [53] Zhang Q, Wang Y H, Zhang M J, et al. Distributed temperature measurement with millimeter-level high spatial resolution based on chaotic laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 104208.  
张倩, 王亚辉, 张明江, 等. 毫米级高分辨率的混沌激光分布式光纤测温技术[J]. *物理学报*, 2019, 68(10): 104208.
- [54] Wang Y H, Zhao L, Zhang M J, et al. Dynamic strain measurement by a single-slope-assisted chaotic Brillouin optical correlation-domain analysis[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1822-1825.
- [55] Zhao L, Wang Y H, Hu X X, et al. Effect of chaotic time delay signature on Brillouin gain spectrum in the slope-assisted chaotic BOCDA[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18189-18201.
- [56] Wang Y H, Zhao L, Hu X X, et al. High-accuracy dual-slope-assisted chaotic Brillouin fiber dynamic strain measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 100704.  
王亚辉, 赵乐, 胡鑫鑫, 等. 高精度双斜坡辅助式混沌布里渊光纤动态应变传感[J]. *物理学报*, 2021, 70(10): 100704.
- [57] Zhao L, Wang Y H, Hu X X, et al. Improvement of strain measurement accuracy and resolution by dual-slope-assisted chaotic Brillouin optical correlation domain analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(10): 3312-3318.
- [58] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [59] Boyd R W. *Nonlinear optics*[M]. 3rd Ed. Pittsburgh: Academic Press, 2003.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] Qiao L J, Lü T S, Xu Y, et al. Generation of flat wideband chaos based on mutual injection of



- semiconductor lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5394-5397.
- [63] Yang Q, Qiao L J, Zhang M J, et al. Generation of a broadband chaotic laser by active optical feedback loop combined with a high nonlinear fiber[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1750-1753.
- [64] Zhang M J, Xu Y H, Zhao T, et al. A hybrid integrated short-external-cavity chaotic semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1911-1914.
- [65] Li M W, Zhang X C, Zhang J Z, et al. Long-range and high-precision fault measurement based on hybrid integrated chaotic laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1389-1392.