

布里渊光相干域分析技术研究进展

胡鑫鑫¹, 王亚辉^{1,2}, 赵乐², 张倩², 张明江^{1,2*}, 张建忠^{1,2}, 乔丽君¹, 王涛¹, 高少华²

¹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;

²太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

摘要 布里渊光相干域分析(BOCDA)技术可以实现长传感距离、高空间分辨率和高速的分布式温度或应变传感, 在大型结构健康监测、现代工业等领域具有广阔的应用前景。分别综述了正弦频率调制型 BOCDA、相位调制型 BOCDA 和宽带光源型 BOCDA 近年来的研究进展, 其中宽带光源型 BOCDA 包括基于放大自发辐射的 BOCDA 和本课题组提出的混沌激光 BOCDA。对比了这些技术的优缺点, 分析了 BOCDA 系统的性能, 并对 BOCDA 技术的发展前景进行了展望。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 布里渊散射; 布里渊光相干域分析; 分布式光纤传感

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0100001

1 引言

随着现代信息技术的蓬勃发展, 光纤传感作为信息技术应用创新产业的重要一环得到了广泛的关注。光纤传感技术具有测量灵敏度高、分辨率高、传感距离长和抗电磁干扰等优势, 已广泛应用于现代工业、土木结构健康监测以及国防安全等诸多领域^[1-5]。

分布式光纤传感技术可实现光纤沿线任意位置的监测, 因此成为目前国内外的研究热点^[6-9]。基于布里渊散射的分布式光纤传感器具有沿光纤连续测量温度或应变的能力, 根据光纤探测信号与传感机理的不同, 布里渊分布式光纤传感技术主要分为以下 4 种: 布里渊光时域反射(BOTDR)技术^[10-13], 布里渊光时域分析(BOTDA)技术^[14-19], 布里渊光相干域反射(BOCDR)技术^[20-23], 以及布里渊光相干域分析(BOCDA)技术^[24-28]。基于自发布里渊散射的反射型技术的布里渊信号较弱, 信噪比(SNR)低, 这极大限制了传感距离的进一步增加。基于脉冲光源的光时域技术通过脉冲信号的飞行时间实现应变或温度区的识别与定位, 虽然能够实现长距离的分布式测量(最高可达 120 km 以上), 但受声子寿命的限制, 其空间分辨率难以突破 1 m。基于低相干光源的光相干域技术利用窄带相关峰实现了高空间分辨率(可达毫米量级甚至亚毫米量级)的传感; 然

而, 传统的光相干域系统需要逐个扫描相关峰(传感点)的位置才能完成分布式测量^[20, 22-23], 这严重限制了测量速度, 且周期性相关峰不能保证较长的传感距离^[29-30]。

本文主要分析了 BOCDA 技术, 包括正弦频率调制型、相位调制型和宽带光源型三种。针对其在传感距离、空间分辨率和测量速度方面存在的问题, 从理论上分析并综述了近些年 BOCDA 技术的研究进展, 并对其未来的发展趋势进行了展望。

2 基本原理

2.1 BOCDA 技术的传感原理

BOCDA 技术是基于受激布里渊散射(SBS)放大效应的一种分布式光纤传感技术。频率失谐的泵浦光和探测光从光纤两端相向入射, 通过电致伸缩效应激发出布里渊声波场, 泵浦光、探测光和声波场三者之间相互耦合; 当两束光的频差 ν 等于光纤的布里渊频移量 ν_B 时出现受激布里渊散射峰值, 最终结果表现为泵浦光的功率转移给探测光, 探测光在受激布里渊散射作用下得到增强^[31-32]。布里渊增益通常由一个呈洛伦兹形的布里渊增益谱(BGS)来表征, 其表达式为^[33]

$$g_B(\nu) = \frac{g_{B0}}{1 + 4(\nu - \nu_B)^2 / \Delta\nu_B^2}, \quad (1)$$

收稿日期: 2020-07-22; **修回日期:** 2020-08-19; **录用日期:** 2020-09-04

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

***E-mail:** zhangmingjiang@tyut.edu.cn

式中: g_{B0} 为布里渊增益系数; $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益线宽; ν_B 为布里渊频移量(BFS)。光纤的 BFS 由 BGS 中增益峰值对应的频率决定, 可表示为 $\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda}$, 其中 n 是光纤的折射率, V_a 是光纤中的声速, λ 是泵浦光的波长^[34-36]。

BOCDA 系统中, 在不考虑光纤中的光损耗的情况下, SBS 过程可以通过三个耦合方程表示^[37]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + V_g \frac{\partial}{\partial z} \right] A_p = i\kappa_1 A_s \rho, \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - V_g \frac{\partial}{\partial z} \right] A_s = i\kappa_1 A_p \rho^*, \quad (3)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\Gamma_B}{2} + i\delta\omega_B \right] \rho = i\kappa_2 A_p A_s^*, \quad (4)$$

式中: V_g 为光在光纤中的群速度; Γ_B 为声场阻尼率, $\Gamma_B = 2\pi\Delta\nu_B$; κ_1 和 κ_2 为耦合系数, $\kappa_1 = \pi V_g \gamma_e / (2n\lambda\rho_0)$, $\kappa_2 = \pi n \epsilon_0 \gamma_e / (4\lambda V_a)$, γ_e 是弹性系数; A_p 、 A_s 和 ρ 分别是缓慢变化的泵浦波、探测光和声波场的复振幅, 它们是光波在长为 L 的待测光纤(FUT)上的位置 z 和时间 t 的函数。

根据扰动理论求解耦合方程[(2)~(4)式], 可以得出探测光在 FUT 中传输时的增益函数^[33]:

$$g = \frac{V_g \bar{P}_1}{A_{\text{eff}}} \int_{-\infty}^{\infty} d\zeta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} g_B(\zeta, \omega) * S_b(\zeta, \omega), \quad (5)$$

式中: \bar{P}_1 表示泵浦光的平均功率; ω 为泵浦光的角频率; $\zeta = z/V_g$; $g_B(\zeta, \omega)$ 是长度为 $V_g d\zeta$ 的光纤区域上位置 ζ 处的布里渊增益谱; $S_b(\zeta, \omega)$ 为泵浦光和探测光在位置 ζ 处的拍频谱。因此, 探测光在位置 ζ 处的增益谱由光纤布里渊增益谱 g_B 和泵浦光与探测光的拍频谱 S_b 的卷积确定, 总增益是对增益沿光纤进行积分得到的。

如图 1 所示, 如果对两个光波进行相同的波形调制, 则在光纤的特定位置(即相关峰)处, 这两个光波高度相关, SBS 仅发生在相关峰内。图 1 中 P 表示布里渊增益谱和拍频谱的功率, g 表示探测光的增益, ν 表示泵浦光和探测光之间的频差。(5)式阐述了布里渊增益谱的一般获取方法: 在相关峰处, 拍频谱 S_b 是关于频率的类 δ 函数, 当改变两个光之间的频率差使拍频谱沿频率 ω 方向移动时, 探测光在该相关峰处所产生的增益会根据此处 BGS 的变化而变化; 相反地, 在相关峰之外的其他地方, 即低相关位置, 拍频谱 S_b 得到展宽, 此时再移动拍频谱, 探测光的增益很小且近乎为常数。因此, 相关峰位置处的 BGS 可以等效地反映在光纤输出端的探测功率变化上。通过扫频改变泵浦光与探测光之间的频差 ν , 重构光纤各处的 BGS, 然后计算出光纤各位置处的布里渊频移量, 最终实现应变/温度的分布式传感。

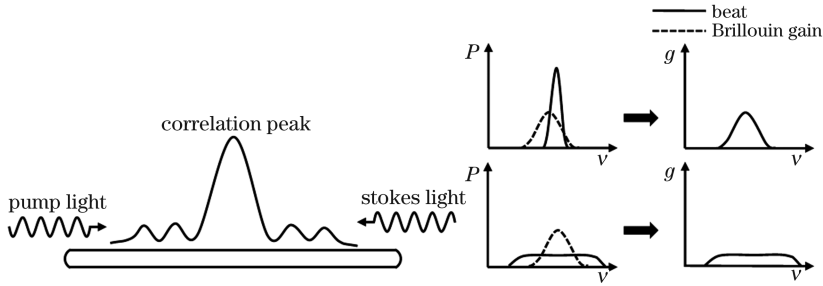


图 1 BOCDA 布里渊增益谱测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Brillouin gain spectrum measurement for BOCDA

BOCDA 系统中布里渊增益决定于相关峰中激发的受激布里渊声波场, 位置 z 处声波场大小的期望值(对于 $t \gg \tau$)为^[38]

$$\overline{Q(z, t)} = jg_1 \int_0^t \exp[-\Gamma_A(t-t')] A_p \left(t' - \frac{z}{V_g} \right) A_s^* \left[t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z) \right] dt', \quad (6)$$

式中: $t' = t - L/V_g$; g_1 为电致伸缩系数; $\theta(z)$ 为与位置相关的时间偏移量, $\theta(z) = (2z - L)/V_g$; Γ_A 为复线宽, 当 $\nu = \nu_B$ 时, 复线宽 $\Gamma_A = \Gamma_B/2 = 1/(2\tau)$ 。这样, 有效的声波场被限制在半峰全宽极窄的相关峰, 该范围对应于光源相干长度的一半, 位于待测光纤的中间位置 $\theta(L/2) = 0$ 处。因此,

BOCDA 系统的空间分辨率决定于相关峰的宽度, 且不受声子寿命的限制^[39], 利用该系统可获得厘米级甚至毫米级的高空间分辨率。此外, 光源带宽越宽, 其相干长度越短, 则相关峰越窄, 空间分辨率越高。同时, 相关峰在待测光纤中的位置可以任意调节, 从而可实现光纤沿线位置的随机寻址。

2.2 BOCDA 技术的讨论

在 BOCDA 系统中,布里渊相互作用在空间上受限于光源的相干长度。因此,实现高空间分辨率要求需使用相干性相对较低的光源。目前已经提出了多种类型的基于低相干态光源的 BOCDA 技术,例如正弦频率调制型、相位调制型、放大自发辐射(ASE)和混沌激光等宽带光源型。

在传统的正弦频率调制型 BOCDA (Sine-FM BOCDA)中,同步调制的探测光与泵浦光可产生周期性的窄带相关峰,为防止相邻相关峰之间的增益串扰,需要匹配合适的待测光纤长度使得仅存在唯一相关峰,并通过改变正弦调制频率实现传感光纤的完全扫描。因此,传统方案的测量范围受限于周期性相关峰的间隔,其与空间分辨率难以兼顾。此外,该系统还存在由直流调制引起的带宽限制,导致调制频率和调制幅度很难同时满足大带宽需求;为了获得毫米级空间分辨率,可使用强度调制器补偿强度啁啾,这增加了系统的成本和复杂度。

相位调制型 BOCDA (Phase-coded BOCDA) 是一种将长传感距离与高空间分辨率相结合的技术。该方法利用伪随机序列(PRBS)^[40-41]或 Golomb^[42]

码^[42-43]对连续光进行相位调制,周期性相关峰的间隔决定于序列长度,该方法可有效拓宽系统的测量范围。然而,不完全相位调制导致的非峰值布里渊相互作用会引入额外的噪声,且噪声会随光纤长度的增加累积,从而使得系统的传感性能恶化。此外,为了获得更高的空间分辨率,需要具有更高调制速率的调制器件,这进一步增加 BOCDA 系统的成本和复杂度。

研究者们还提出了利用宽带低相干光源作为探测信号的 BOCDA 系统,这类系统主要包括基于放大自发辐射的 BOCDA (ASE-based BOCDA) 和本课题组提出的混沌激光 BOCDA (Chaos-based BOCDA)。上述光源的宽带低相干特性确保了任意长待测光纤中仅存在唯一的相关峰,且空间分辨率可轻松达到毫米量级;混沌 BOCDA 系统还成为兼顾长传感距离和高空间分辨率的优选测量方案。然而,此类系统需要匹配并调节可变光延迟线以实现整条光纤的扫描,测量时间和工程实用性受到极大的挑战。

表 1 对比了 4 种 BOCDA 技术的主要特点与性能指标。

表 1 4 种 BOCDA 技术的主要特点与性能指标

Table 1 Main features and performance indicators of four BOCDA technologies

Category	Advantage (optimal results)	Disadvantage	Common problem
Sine-FM BOCDA	High spatial resolution (1.6 mm@5 m ^[44]); preferable SNR	Bandwidth predicament of direct modulation; higher cost and complexity	
Phase-coded BOCDA	Long sensing distance (8.3 mm@17.5 km ^[41]); high speed measurement (185 point/s ^[41])	High-rate modulation devices; higher cost and complexity	Shorter sensing distance (< 20 km);
ASE-based BOCDA	High spatial resolution (4 mm@5 cm ^[38])	Poor SNR; limited sensing distance; poor practicability	longer measurement time (1.5 h@17.5 km ^[41])
Chaos-based BOCDA	High spatial resolution (3.5 mm@165 m ^[45]); simplicity of obtaining bandwidth-enhanced chaos	Long measuring time; utilization of PODG (programmable optical delay generator)	

3 正弦频率调制型 BOCDA

3.1 基本原理

Sine-FM BOCDA 系统的泵浦光和探测光经频率调制后可在待测光纤中发生一系列干涉拍频作用,其工作原理如图 2 所示。当泵浦光和探测光的频差 ν 为一常数时,会产生周期性相关峰。两个波之间的拍频频率 f_B 可表示为^[46]

$$f_B(\Delta x, t) = \nu + 2\Delta f \cdot \sin\left(2\pi f_m \cdot \frac{\Delta x}{V_g}\right) \cdot \cos\left[2\pi f_m \left(t - \frac{\Delta x}{V_g}\right)\right], \quad (7)$$

式中: f_m 和 Δf 分别为光源的调制频率和调制幅度; Δx 为泵浦光和探测光之间的传播长度差。如图 2(a) 所示,在相关峰处,(7)式中的正弦项消失,拍频谱变成类 δ 函数,表现为洛伦兹形的

BGS;相反,随着拍频位置偏移相关峰,局部拍频谱逐渐展宽,导致背景噪声逐渐累积,这可表征为BGS的噪声基底结构。因此,如图2(b)所示,BOCDA信号(即输出探测光的增益)由来自相关峰处的BGS和来自FUT所有其他位置的梯形噪声结构组成。

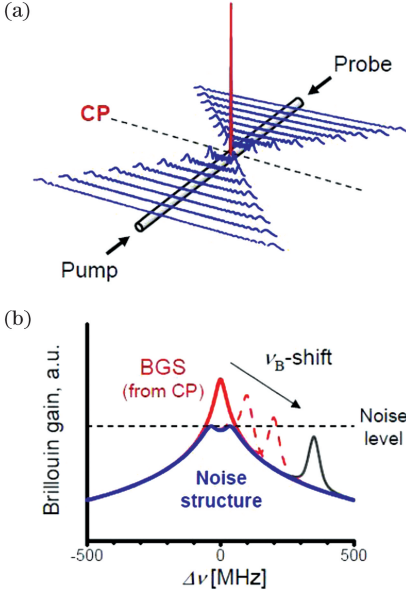


图2 BOCDA系统的工作原理^[47]。(a)相关峰附近泵浦光和探测光拍频谱的分布;(b)BOCDA信号的结构

Fig. 2 Working principle of BOCDA system^[47]. (a) Distribution of pump-probe beat spectrum near correlation peak (CP); (b) structure of BOCDA signal

Sine-FM BOCDA系统的测量距离 d_m (相邻相关峰的间隔)和空间分辨率 Δz 分别为^[48]

$$d_m = \frac{c}{2nf_m}, \quad (8)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta\nu_B}{\Delta f} \frac{V_g}{2\pi f_m} (f_m < \Delta\nu_B/2). \quad (9)$$

为了更精准地描述分布式光纤传感系统的性能,研究者们提出了一个量化指标——分辨点数量 N ,其由测量距离和空间分辨率之间的比值给出:

$$N = \frac{d_m}{\Delta z} = \frac{\pi\Delta f}{\Delta\nu_B}. \quad (10)$$

由(10)式可知,选定 f_m 和 Δf 可确定理论空间分辨率;通过匹配传感光纤长度使FUT中存在唯一相关峰,从而避免布里渊增益的串扰;通过微量调节 f_m 可改变相关峰的位置,实现对待测光纤的随机访问与分布式测量,且不影响系统整体传感点数 N (仅与 Δf 有关)。

3.2 正弦频率调制型BOCDA的发展

3.2.1 基本正弦频率调制型BOCDA系统

2000年Hotate课题组首次提出了基于正弦频率调制的BOCDA系统^[33],实验装置如图3(a)所示,通过频率为 f_m 的正弦波对分布式反馈半导体激光器(DFB-LD)进行直接调制,发出的光经耦合器分为两路。一路经过由微波信号驱动的电光调制器(EOM)后移频 ν (接近 ν_B),实现双边带调制以抑制载波,其中低频边带作为探测光;另一路经过EOM的强度调制后作为泵浦光,用于锁相放大探测。实验中通过扫描微波源的频率 ν 获得BGS,通过改变频率 f_m 实现BGS的分布式测量。实验中待测光纤由布里渊频移 $\nu_{B1} = 10.83$ GHz的普通单模光纤(SMF)和布里渊频移 $\nu_{B2} = 10.56$ GHz的色散位移光纤(DSF)组成,图3(b)是两种光纤分别在 ν_{B1} 和 ν_{B2} 处获得的布里渊增益分布,实际空间分辨率估计为布里渊增益分布中瞬态范围长度的一半,其值约为40 cm,与由(9)式获得的37 cm的理论值非常吻合。

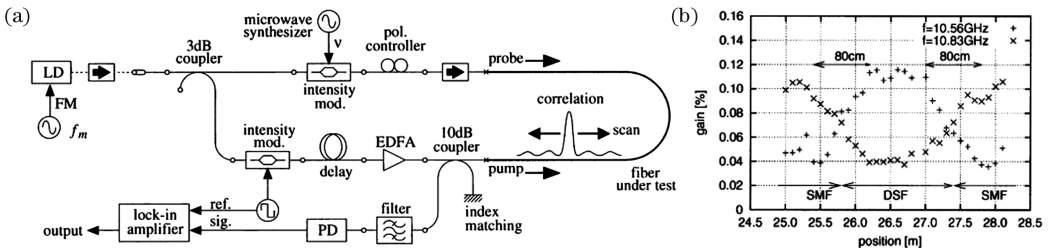


图3 基于正弦频率调制的BOCDA系统的实验装置和布里渊增益分布^[33]。(a)实验装置;(b)布里渊增益分布
Fig. 3 Experimental setup of sine-FM BOCDA system and distribution of Brillouin gain^[33]. (a) Experimental setup; (b) distribution of Brillouin gain

3.2.2 空间分辨率的提高

在基于脉冲光源的传感方案中,将空间分辨率

估计为脉冲宽度的一半^[34],且要求光脉冲的脉宽长于声子寿命,否则展宽的BGS将严重影响系统的测

量精度。而在光相干域技术中,相关峰处的拍频谱始终保持类 δ 函数特性,这样容易实现高空间分辨率;同时,空间分辨率由光源的调制参数(f_m 和 Δf)决定。

由(8)和(9)式可知,在保持测量范围的同时提高空间分辨率需要增大调制幅度 Δf 。然而当 $\Delta f > \nu_B/2$ 时,泵浦光和探测光的光谱开始重叠,而频率重叠处泵浦光的瑞利后向散射无法通过光学滤波器滤除,这限制了空间分辨率的提升。2006年, Song 等^[49]提出双锁相探测方案,通过分别对泵浦光和探测光进行不同频率的锁相探测来解决这一问题。同年,该课题组引入拍频锁相探测方案来进一步简化系统^[44],其原理如图4所示,给泵浦光和探测光施加不同的斩波频率,并在它们的拍频处使用一个锁相放大器进行信号采集。利用该方案实现了毫米级空间分辨率(小于 1.6 mm)的分布式应变测

量,抑制了泵浦光的后向瑞利散射噪声。然而,在该系统中,受直流调制的带宽限制, Δf 和 f_m 很难同时满足大带宽需求;通过引入强度调制器补偿强度啁啾,这进一步增加了系统的成本和复杂度;此外,由于 LD 的高调制频率,系统信噪比低,测量范围被限制在 5 m 以内。

该系统存在如图 2(b)所示的信号特征:随着相关峰处施加的应变增大,布里渊增益信号逐渐偏移,而噪声结构保持不变;在应变大小超过测量范围时,增益信号降低到噪声水平以下,系统信噪比严重恶化,使系统无法准确识别应变。因此,背景噪声限制了分布式测量的动态范围(最大可测布里渊频移 ν_B),同时使空间分辨率受限。

2012年, Jeong 等^[47]提出了基于差分测量方案的 BOCDA 系统。传统 Sine-FM BOCDA 系统测得的信号(Signal1)如图5(a)所示;该方案在泵浦路

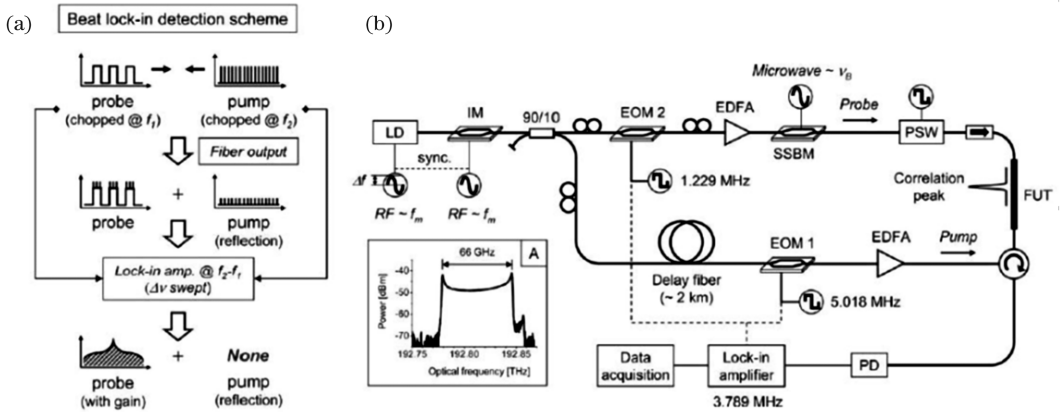


图 4 拍频锁相探测的 BOCDA 的原理示意图和实验装置^[44]。(a)原理示意图;(b)实验装置

Fig. 4 Schematic illustration and experimental setup of BOCDA based on beat lock-in detection^[44]. (a) Schematic illustration; (b) experimental setup

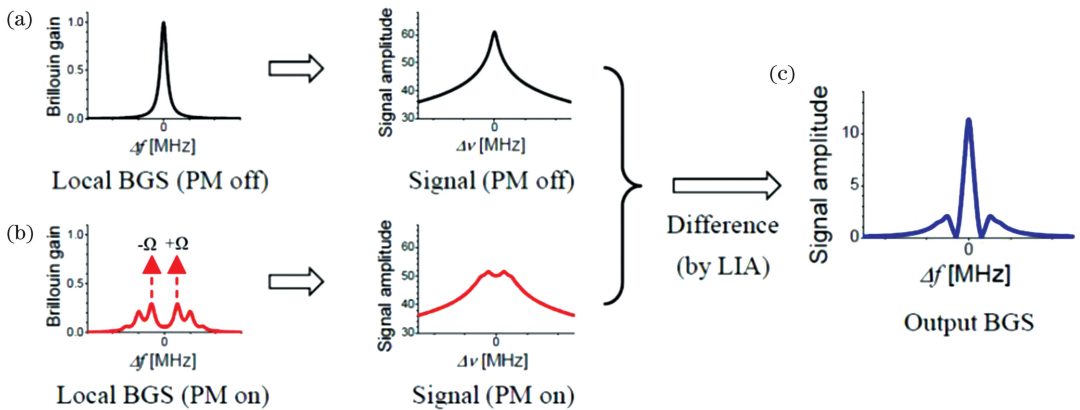


图 5 BOCDA 的差分测量原理示意图^[50]。(a)用普通泵浦波构造 Signal 1;(b)用调相泵浦波构造 Signal 2;(c)基于 Signal 1 和 Signal 2 的差异进行差分测量

Fig. 5 Schematic illustrations of differential measurement for BOCDA^[50]. (a) Construction of Signal 1 with ordinary pump wave; (b) construction of Signal 2 with phase-modulated pump wave; (c) differential measurement by analyzing the difference of Signal 1 and Signal 2

施加额外的相位调制 (PM), 调制信号频率为 Ω ($\Delta f \gg \Omega$), 因此原始位置的本征增益特性发生改变, 测得系统的噪声基底信号 (Signal 2) 如图 5(b) 所示; 通过对 Signal 1 和 Signal 2 的差分检测即可获得纯净的 BGS, 如图 5(c) 所示。差分测量方案从根源上完全消除了如图 2(b) 所示的噪声结构, 不仅扩大了应变/温度监测的动态范围, 系统的空间分辨率也得到大幅提高。通过实验证明了该方案可达到 2 cm 的空间分辨率, 比相同参数下传统型 BOCDA 系统的空间分辨率提升了 5 倍。

与之类似, 研究者们还提出了使用强度调制 (IM)^[46,51-52] 抑制背景噪声。然而, 这种方案也需要确保 IM(或 PM) 调制信号与激光源调制信号之间的严格同步, 增加了系统复杂度, 且测量过程相当耗时^[47], 这些都不利于动态参量监测。2019 年, Wang 等^[53] 提出了一种简便易行的凸度提取算法以消除 BGS 的噪声基底, 通过实验证明了大于 16 mε/800 °C 的应变/温度测量范围, 空间分辨率提升了 5 倍 (20 m 的测量范围对应 4 mm 的空间分辨率), 且后续数据处理方法不增加系统复杂性, 该算法适合多种测量条件。

3.2.3 测量范围的扩大

在相干域系统中, 空间分辨率和测量范围密切相关^[33], 然而系统难以兼顾这两个性能指标, 其测量范围受限于相关峰之间的间隔^[44,54-55]。由 (8) 式可知,

通过减小调制频率 f_m 即可扩大测量范围, 然而这又会使空间分辨率降低 [(9) 式]。目前, 已经有很多方法被提出以扩大 Sine-FM BOCDA 的测量范围。

一方面, 根据 (10) 式, 通过增加激光源的调制幅度 Δf , 可实现分辨点数量 N 的增加。例如, 2017 年, Wang 等^[56] 利用简并四波混频 (FWM) 过程将 Δf 扩展至 74 GHz, 实现目前 BOCDA 系统最大的频率调制幅度, 分辨点的数量从理论值 1936 增至 3872, 并在 900 m 长的光纤上实现了近 20 cm 的空间分辨率。

另一方面, 通过在被测光纤上构建多个相关峰, 将每个相关峰处的 BGS 区分开, 进而消除相邻相关峰的间隔对系统测量范围的限制。2012 年, Jeong 等^[57] 提出频分复用 BOCDA 系统, 其原理如图 6(a) 所示, 其中 FUT 由具有不同布里渊频移 ν_B 的三段光纤组成, 通过匹配光纤长度使每根光纤中仅存在一个相关峰。由于不同光纤的 ν_B 不同, 可以通过调节微波频率 ν 的扫描范围选择性测量每根光纤中的 BGS 分布。因此, 该方案可以在保持空间分辨率的同时将测量范围扩大 3 倍, 并在 300 m 测量范围内实现了 8 cm 空间分辨率的分布式应变测量。与之类似, 该课题组还提出了双向探测方案^[58] 和泵浦-探测光切换方案^[59] [图 6(b)], 这两个方案均将测量范围扩大 1 倍, 分别实现了 200 m 和 146 m 的传感距离, 同时空间分辨率仍保持在厘米量级。

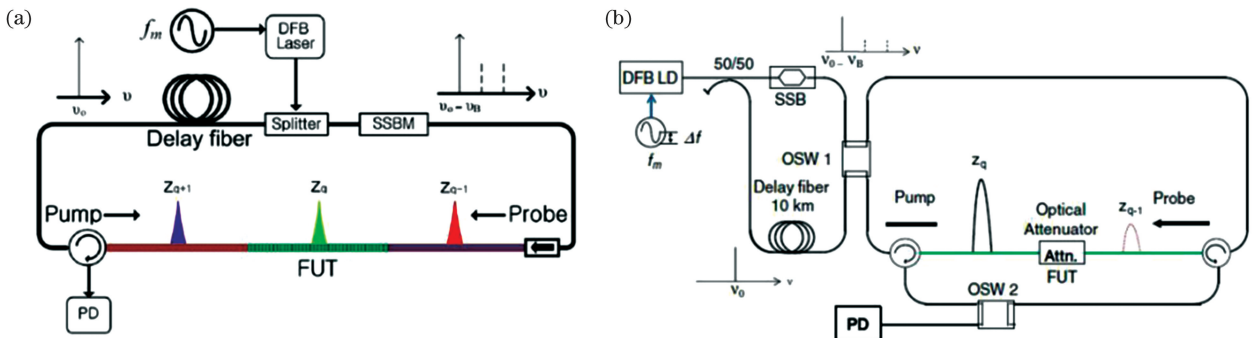


图 6 利用多个相关峰的 BOCDA 系统示意图。(a) 连接不同光纤的 BOCDA 系统示意图^[57]; (b) 泵浦-探测光切换的 BOCDA 系统示意图^[59]

Fig. 6 Diagrams of BOCDA system using multiple correlation peaks. (a) Diagram of BOCDA system connecting different optical fibers^[57]; (b) diagram of BOCDA system with pump-probe switching^[59]

2005 年, Hotate 等^[60] 提出了时域门控 BOCDA 系统, 采用了时分复用泵浦-探测光生成方案, 由 EOM 对经过正弦调制的光波进行时域门控, 将光波调制成脉冲, 其原理如图 7(a) 所示。该方案中脉冲宽度等于正弦频率调制的周期, 以便在周期性相关峰 (假设有 n 个) 中选择一个进行定位, 从而将测量范围扩大 n

倍。实验结果表明, 该系统的测量范围为 250 m, 是传统型 BOCDA 系统的 25 倍, 空间分辨率为 8 cm。2008 年, Hotate 等^[61] 对该系统进行了优化, 使用 EOM1 和 EOM2 分别对泵浦光和探测光进行时域门控, 最终实现了测量范围超过 1 km、空间分辨率为 7 cm 的分布式应变测量, 分辨点的数量接近 15000。

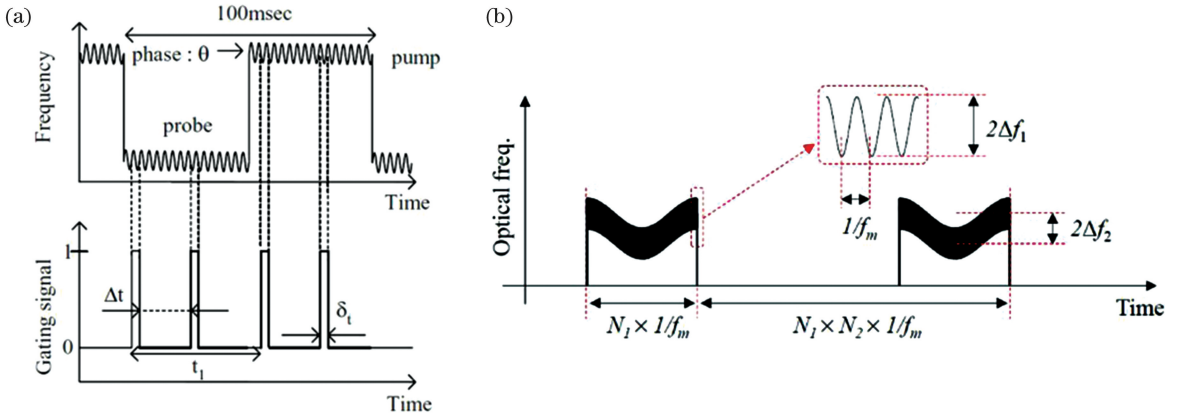


图 7 基于时域门控的 BOCDA 系统原理示意图。(a)时域门控的原理示意图^[60]；(b)基于双调制和时域门控的 BOCDA 系统的调制方案的示意图^[50]

Fig. 7 Schematic diagrams of BOCDA system based on temporal gating. (a) Schematic illustration of temporal gating^[60] ; (b) modulation scheme for BOCDA system based on double modulation and temporal gating^[50]

为了进一步拓展传感范围,2015 年, Kim 等^[50]提出了一种基于差分测量方案并应用双调制和时域门控的 BOCDA 系统,其原理如图 7(b)所示。在双调制中,将两个调制频率($f_m, f_m/N_1$)应用于光源,两个调制幅度分别为 Δf_1 和 Δf_2 ;空间分辨率仅由快调制参数(即 f_m 和 Δf_1)决定,而慢调制(f_m/N_1 和 Δf_2)的作用是将测量范围扩大 N_1 倍;使用时域门控将测量范围进一步扩大 N_2 倍。因此,双调制可以将测量范围整体扩大 $N_1 \times N_2$ 倍。沿 10.5 km 长光纤上的分布式应变和温度传感实验得到的测量范围扩大了 2000 倍,空间分辨率小于 1 cm,对应超过 100 万个分辨点,这是目前传感距离最长、分辨点数量最多的 Sine-FM BOCDA 系统。然而该系统的分布式测量需要大量时间,单点访问时间为 20 s,这

严重降低了系统的实用性。

为提升系统的测量速度,2017 年, Ryu 等^[62-63]提出在差分测量 BOCDA 系统中运用时域数据处理,其原理如图 8 所示。将泵浦光调制成高消光比的脉冲,探测光仍为连续光。当泵浦脉冲光沿着 FUT 传播时,泵浦光和探测光依次在不同位置处的相关峰内相互作用,通过分析输出探测光的时序获得不同相关峰处的布里渊增益,实现多个相关峰的同时访问;当测量范围扩大 n 倍时,系统可同时访问 n 个相关峰,这有效地减少了相关峰扫描次数和数据采集时间。实验沿着 10.15 km 长的待测光纤以小于 5 cm 的空间分辨率同时访问了 980 个相关峰,获得 20 万个分辨点的 BGS 所需测量时间为 15940 s(即 12.6 点/s)^[63]。

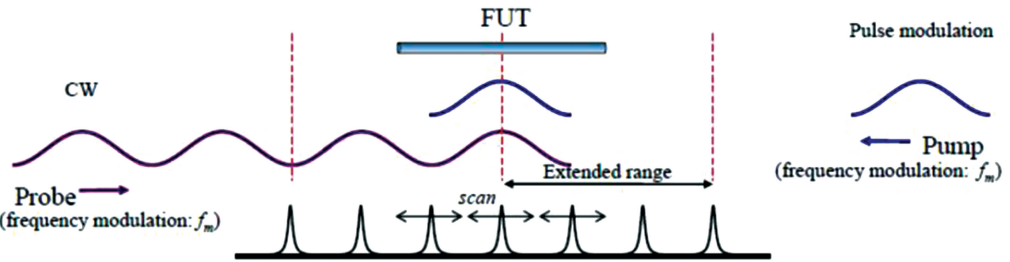


图 8 结合时域数据处理的 BOCDA 系统调制的原理示意图^[62]

Fig. 8 Schematic illustration of modulation of BOCDA system with time-domain data processing^[62]

3.3 发展历程总结

图 9 给出了 Sine-FM BOCDA 系统的发展历程。

4 相位调制型 BOCDA

4.1 基本原理

与 Sine-FM BOCDA 不同, Phase-coded BOCDA

对泵浦光和探测光进行相位调制。假设相位序列的码宽为 T , 码长为 M , $u(t)$ 表示二进制相位序列, 则有

$$u(t) = \sum_m a_m \text{rect}\left(\frac{t - mT}{T}\right), \quad (11)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; a_m 是相位序列的值, 在基于 PRBS 的相位调制 BOCDA 中, 每个符号以相

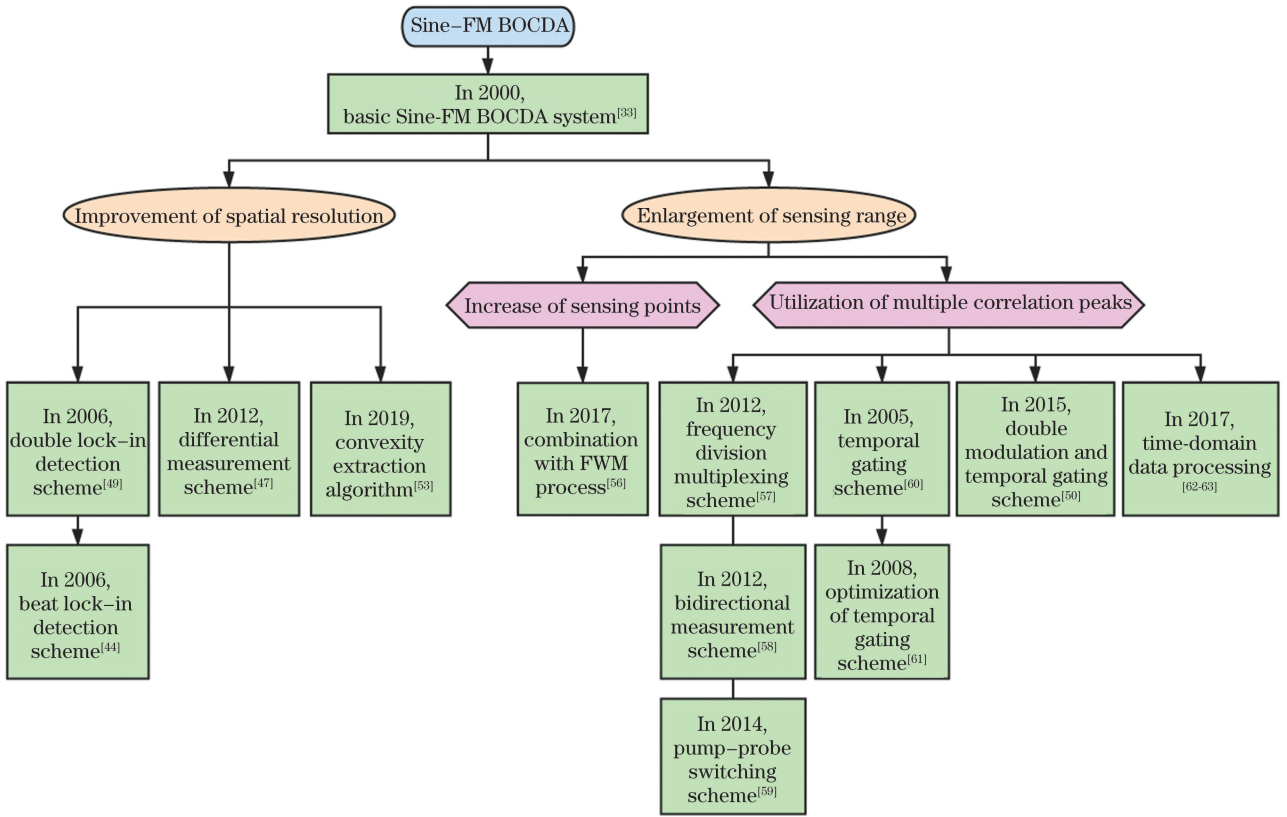


图 9 Sine-FM BOCDA 系统的发展历程

Fig. 9 Development process of Sine-FM BOCDA system

等的概率取 +1 或 -1^[40], 且码宽 T 比声子寿命 $\tau = 1/\Gamma_B$ 短得多^[64]。

因此, 相位调制声波场大小的期望值 (对于 $t \gg \tau$) 为

$$\overline{Q(z, t)} = jg_1 A_{p0} A_{s0}^* \int_0^t \exp[-\Gamma_A(t-t')] \gamma_u[\theta(z)] dt' = j \frac{g_1 A_{p0} A_{s0}^*}{\Gamma_A(\omega, z)} \gamma_u[\theta(z)], \quad (12)$$

式中: $\gamma_u[\theta(z)] = u\left(t' - \frac{z}{V_g}\right) u^*\left[t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z)\right]$ 为 $u(t)$ 的自相关函数。

Phase-coded BOCDA 的原理如图 10 所示, 假设泵浦光 (探测光) 的调制相位等概率为 0 或 π , 且两个波是同步调制的, 则泵浦光和探测光只能在相位差恒定的位置 (光纤中心相关峰) 处激发出声波场, 形成持续的动态布拉格光栅。在 PRBS 相位调制下, 相关峰处具有固定的声波场复振幅, 即 $Q(L/2, t) = jg_1 A_{p0} A_{s0}^* / \Gamma_A(\Omega, z)$ 。在相关峰外, 两个光波的相位差是随机的, 声波场时而被增强, 时而被削弱, 形成了弱随机光栅; 非峰值布里渊相互作用产生的噪声会在整个 FUT 长度上累积, 并导致输出信号的功率产生波动, 成为系统的主要噪声, 称之为“相位编码噪声”。光信噪比 (OSNR) 定义为相关峰内耦合功率与由相位编码噪声导致的输出信号功率方差之间的比。对于 PRBS 相位调制, OSNR

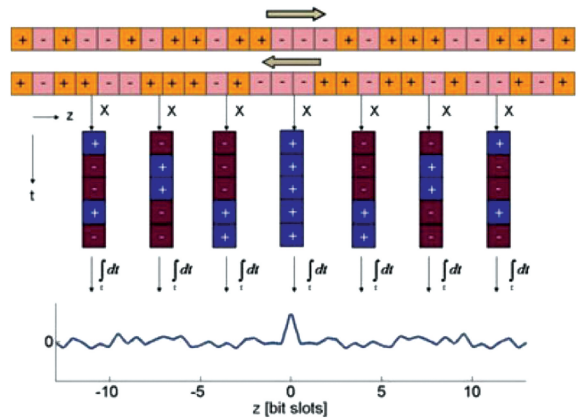


图 10 相位调制型 BOCDA 的原理图^[40]

Fig. 10 Schematic diagram of phase-coded BOCDA^[40]

可以估计为^[65]

$$R_{\text{OSNR}} \approx \frac{2V_g \tau}{L}, \quad (13)$$

(13)式中 OSNR 与 FUT 的长度成反比,而与空间分辨率无关。因此,Phase-coded BOCDA 系统要求多次重复采集或在探测器的长积分时间内对采集的时序进行平均^[40]。

Phase-coded BOCDA 系统的空间分辨率为

$$\Delta z = \frac{1}{2} V_g T. \quad (14)$$

通过减小码宽 T 可提高空间分辨率,但是当 T 小于几十 ps 时,就需要超高速调制器件。相位调制沿待测光纤引入周期性相关峰,两个相邻相关峰之间的距离为

$$d_m = \frac{1}{2} M V_g T. \quad (15)$$

由于相位序列的码长 M 可以任意选择,因此 Phase-coded BOCDA 系统的测量范围可以任意长,而不影响空间分辨率^[64]。除中心峰外所有相关峰的位置均随码宽 T 的变化而变化,通过改变 T 即可扫描相关峰的位置,实现分布式传感。同时,码长

M 应足够长以保证待测光纤中仅出现一个相关峰。实验中,为通过很小的码宽变化达到所需的相关峰移动距离从而减小码宽变化对空间分辨率的影响,一般选用较高阶的相关峰在待测光纤中进行位置扫描。与 Sine-FM BOCDA 技术相比,相位调制型 BOCDA 为实现更长的测量范围提供了一条简单的途径。

4.2 相位调制型 BOCDA 的发展

4.2.1 基本相位调制型 BOCDA 系统

2012 年,Zadok 等^[40]首次提出用高速 PRBS 对泵浦光和探测光进行联合相位调制的 BOCDA 系统,开辟了 Phase-coded BOCDA 技术的研究。实验装置如图 11(a)所示,由 PRBS 生成器驱动的電光相位调制器对 DFB 的输出进行相位调制,生成器时钟速率 $1/T$ 在 8~12 GHz 的范围内,对应 0.9~1.3 cm 的空间分辨率,PRBS 的码长为 $2^{15}-1$ 。联合相位调制沿光纤环引入多个相关峰,通过改变 PRBS 的码宽来扫描相关峰的位置,1 MHz 的时钟速率变化对应 34 cm 的相关峰位置偏移。图 11(b)是分布式测量结果,测量范围为 40 m,空间分辨率为 1 cm,4000 个分辨点被测量到。

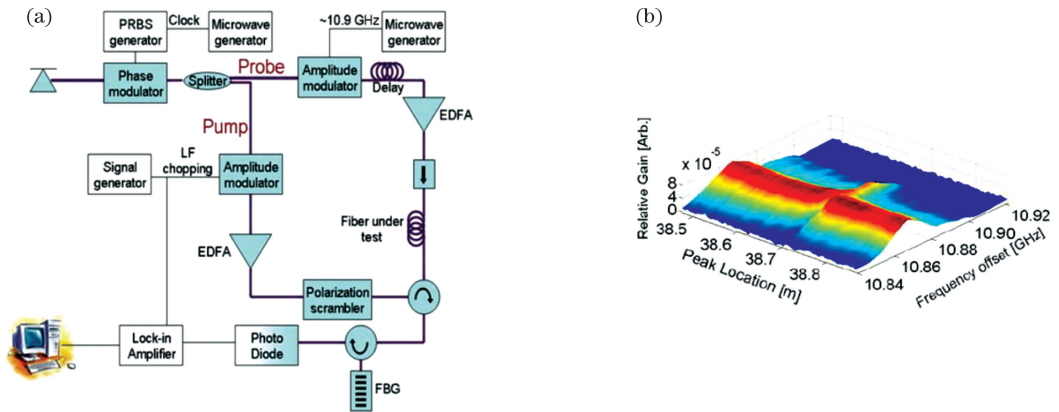


图 11 基于 PRBS 的相位调制 BOCDA 的实验装置和布里渊增益分布^[40]。(a)实验装置;(b)热点附近的布里渊增益分布
Fig. 11 Experimental setup of phase-coded BOCDA based on PRBS and distribution of Brillouin gain^[40]. (a) Experimental setup; (b) distribution of Brillouin gain of heated section

PRBS 相位调制能使 BOCDA 系统同时兼顾测量范围和空间分辨率这两个性能参数。然而该方法仍存在许多挑战:1)系统空间分辨率受调制带宽的限制,10 GHz 以上的 PRBS 生成器及光电调制器件的成本和复杂度会明显上升;2)受相位编码噪声的限制,系统的 OSNR 严重降低^[64],测量范围仍然受限;3)系统单次测量只能重构单个分辨点处的布里渊增益谱,通过使用实验室设备对每个频率偏移 ν 进行成千上万次的单独扫描实现全尺度测量通常是

不切实际的。为了应对上述挑战,研究者们提出了诸多改进方案。

4.2.2 空间分辨率的提高

在传统 Phase-coded BOCDA 中,受调制器带宽的限制,相位调制并不完美。如图 12 所示,当使用不完美的射频(RF)调制信号来调制泵浦光和探测光时,编码相位 0 和 π 之间的切换不是瞬时的,且边缘相位既不是 0 也不是 π 。这种不完美的相位码会导致明显的非峰值布里渊放大,从而降低测量的

OSNR 并限制空间分辨率。峰值相位差没有达到 π ，使得中心峰处光波相关性变差，相关峰强度降低。此

外，当码宽 T 变短时，产生和放大 RF 信号的技术困难显著增加，这也限制了高空间分辨率的实现。

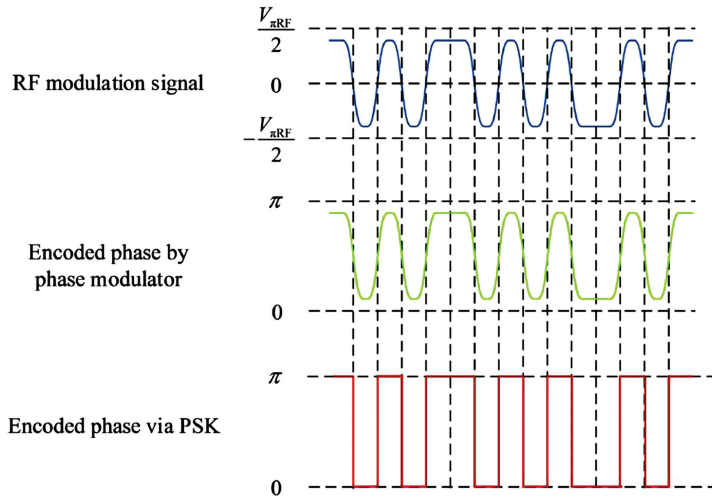


图 12 基于 PSK 的相位调制的示意图^[66]

Fig. 12 Schematic diagram of phase modulation based on PSK^[66]

2019 年, Ba 等^[66]提出了基于相移键控 (PSK) 的相位调制 BOCDA。当不完美的 RF 信号驱动马赫-曾德尔调制器 (MZM) 时, 可以实现从 0 到 π 的零宽度边缘的完美相位转换, 而且这个技术对调制器的带宽和 RF 信号的功率不敏感。数值模拟和实验结果证明, PSK 可以有效抑制非峰值位置的布里渊放大。实验中仅使用 20 GHz 带宽的 MZM 即可实现空间分辨率为 2 mm 的分布式传感, 然而传统型相位调制型 BOCDA 中需要 50 GHz 的超高速生成器与调制器件。

2019 年, Matsumoto 和 Akai^[67]提出了一种基于短脉冲光源的相位调制 BOCDA, 该方案无需超高速调制器件就可以实现高空间分辨率, 使用低占空比的归零 (RZ) 脉冲型 PRBS 码对泵浦光和探测光进行相位调制, 其空间分辨率为

$$\Delta z = \frac{1}{2} r V_g T, \quad (16)$$

式中: r 为 RZ 脉冲的占空比。使用 RZ 短脉冲可以有效地将受激声波场限制在光纤上较短的范围内, 同时保持适当的调制速率。与非归零 (NRZ) 脉冲的情况^[66]相比, 使用 RZ 短脉冲时无需继续提升 PRBS 信号速率即可提高空间分辨率。

此方案的实验装置类似于传统的 PRBS 相位调制型 BOCDA^[40]系统, 利用外腔锁模半导体激光器 (MLLD) 发射的 $T_p = 3$ ps 的 RZ 脉冲作为光源, 其结构如图 13(a) 所示。通过电注入频率在 9.8 ~ 10.8 GHz 之间的时钟信号来执行锁模, 并对 MZM 产生的脉冲序列同步进行 PRBS 相位调制, PRBS 比特率约为 10 Gbit/s。图 13(b) 显示了使用基于 MLLD 的短脉冲光源时测得的 BFS 分布, 从中可以测得 2 mm 长光纤段上的 BFS 变化。测量的空间

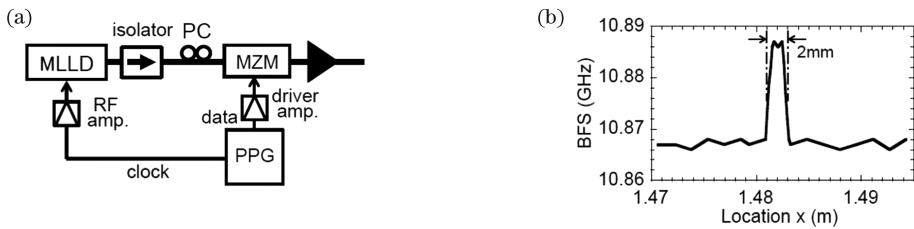


图 13 相位调制短脉冲光源的产生和短脉冲 BOCDA 测得的 BFS 分布^[67]。(a) 由 MLLD 产生的 PRBS 相位调制的短脉冲光源; (b) 测得的 2 mm 长光纤段的 BFS 分布

Fig. 13 Generation of phase-coded short optical pulse source and BFS distribution measured by short-pulse BOCDA^[67]. (a) PRBS phase-coded short optical pulse source generated by MLLD; (b) measured BFS distribution near 2 mm long fiber section

分辨率定义为图 13(b)所示曲线上升和下降区域 10%~90% 的时间差所对应长度的平均值^[68], 为 0.64 mm。

4.2.3 测量范围的扩大

由前述可知, 相位编码噪声限制了分辨点数量和测量范围。2013 年, Denisov 等^[69] 提出了时域门控相位调制型 BOCDA 系统, 用脉冲持续时间为 T_p ($T_p > \tau$) 的脉冲泵浦光取代连续泵浦光。非峰值布里渊放大被限制在脉冲的空间范围, 提高了测量的 OSNR。此外, Golomb 码的循环自相关函数具有零旁瓣, 使用 Golomb 码代替 PRBS 可以大大减小编码噪声^[65,70-72], 因此测量的 OSNR 提高了 3~4 倍, 该提升倍数取决于序列周期 MT ^[65,70,72]。

因此, 2014 年 Elooz 等^[42] 提出了基于 Golomb 码

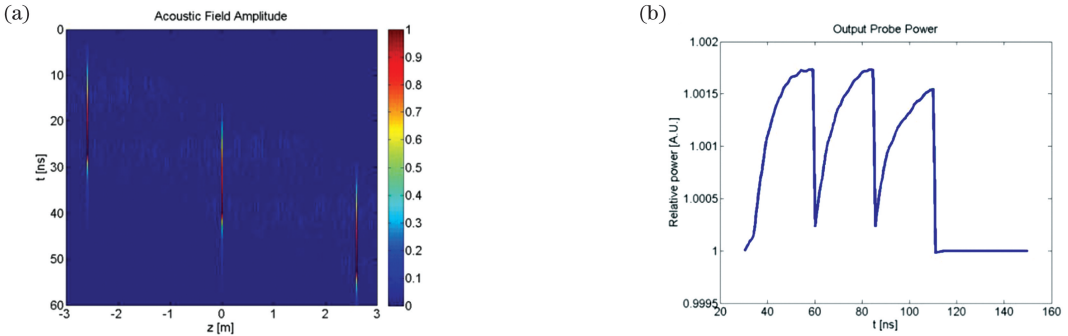


图 14 模拟的受激声波场密度波动和输出信号功率^[42]。(a)模拟的受激声波场密度波动的归一化幅度 $|Q(z, t)|$; (b)模拟的输出信号功率 $|A_s(z=0, t)|^2$

Fig. 14 Simulated acoustic wave density fluctuations and output signal power^[42]. (a) Simulated normalized magnitude $|Q(z, t)|$ of stimulated acoustic wave density fluctuation; (b) simulated output signal power $|A_s(z=0, t)|^2$

2016 年, Denisov 等^[41] 实现了最优的时域门控相位调制型 BOCDA 系统, 在 17.5 km 长的光纤上实现了 8.3 mm 的空间分辨率, 潜在的分辨点超过 200 万, 这是目前传感距离最长、分辨点数量最多的 BOCDA 系统。该方案详细分析了空间分辨率与采样间隔、脉冲宽度与 SNR 和测量时间之间的关系, 以及码长对背景噪声的影响。选择了 70 ns 脉冲宽度和 $2^{10} - 1$ 位长的短 PRBS 的最优化方案, 以最大化相关峰数量和最小化测量时间, 同时提高了 SNR。该方案假设采集系统零延迟, 测量全部分辨点需要 1.5 h, 测量速度比该课题组先前实现的测量速度^[74]快了 20 倍以上。

4.2.4 测量速度的提高

在 Phase-coded BOCDA 中, 决定系统测量速度的主要因素有信号的平均次数、相关峰位置扫描次数和探测光的频率扫描个数, 研究者们分别对这三个因素进行了优化。

的布里渊光相干域/时域混合分析系统, 泵浦光和探测光由相对较短、高速的 Golomb 码进行相位调制, 同时他们对泵浦光进行单脉冲调制 ($T_p \approx MT > \tau$)。泵浦脉冲光的单次传播过程中能产生大量相关峰, 如图 14(a)所示, 通过参数的选择, SBS 相互作用发生在不同的相关峰中, 在时域上没有重叠, 通过测量输出探测光功率可以实现多个相关峰的同时访问。该方案不仅抑制了非峰值布里渊相互作用, 测量的 OSNR 提高了 2 个数量级; 而且如图 14(b)所示, 单条时序即可提供 $L/(M \cdot \Delta z) \gg 1$ 个传感位置的信息, 因此, 整个光纤的 BGS 扫描仅需 M 次。系统在 400 m 长的待测光纤上实现了 2 cm 的空间分辨率。同年, 该课题组在 1600 m 的待测光纤上实现了空间分辨率为 2 cm 的分布式测量, 分辨点数量增加了 4 倍^[73]。

1) 平均次数的减少

Phase-coded BOCDA 系统的信噪比通常受编码噪声、器件噪声(散粒噪声和热噪声)的限制, 时域门控^[41-42,73]和 Golomb 码^[42]的应用仍需辅以高平均次数以提高 SNR, 测量速度明显受限。

2016 年 London 等^[43] 提出了非相干压缩型的相位调制 BOCDA 系统。在周期性相位调制的基础上, 泵浦光的振幅由 10000 bit、持续时间为 $\tau < T_p < MT/2$ 的非周期性序列进行编码, 并在探测器端通过匹配滤波进行后期检测压缩, 其原理如图 15(a)所示, 该方案实现了单个相关峰处的布里渊放大。多个相关峰位置处的 SBS 相互作用将非周期性序列的信息有效地复制在输出探测光的瞬时功率上^[75], 采用非周期性序列的非相干压缩可以将不同位置的增益信号从时域上分离^[76], 实现对单个相关峰处 SBS 相互作用的分析。该方案将扩展的脉冲序列的每个信号压缩为短而强的虚拟脉冲, 残

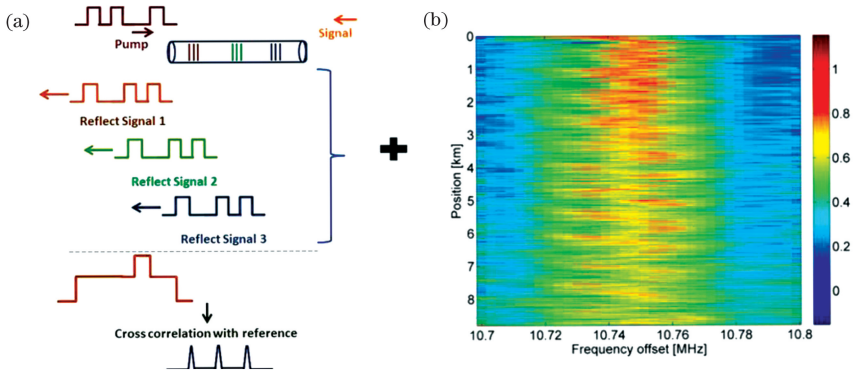


图 15 非相干序列压缩的原理示意图和输出信号的布里渊增益^[43]。(a)原理示意图；(b)输出信号的布里渊增益

Fig. 15 Schematic illustration of incoherent sequence compression and Brillouin gain of output signal^[43]. (a) Schematic illustration; (b) Brillouin gain of output signal

余旁瓣比较弱,且保留了单个强脉冲的高分辨率和高 SNR。

图 15(b)显示了 8.8 km 长光纤上的布里渊增益分布,空间分辨率为 2 cm,分辨点可达到 44 万个。与该课题组之前的工作相比^[75],该方案的分辨点数量增加了 4 倍,每条输出时序可同时监测多达 2000 个相关峰。由单个非周期性序列提供的对散粒噪声和热噪声的抑制等效于对 3000 个单脉冲实验进行平均得到的抑制,因此与单脉冲调制的 BOCDA 系统相比,该方案可有效地减少平均次数和信号采集时间。

2) 位置扫描次数的减少

结合时域数据处理的相位调制型 BOCDA 系统^[41-43,75]可以同时访问多个相关峰,有效地扩大了系统的传感距离。然而,该系统仍需大于 100 的位置扫描次数(决定于序列长度 M),系统测量时间继续受限。

2016 年,Shlomi 等^[77]提出了基于差分脉冲对的相位调制型 BOCDA 系统。该方案进一步缩短了 Golomb 码的序列长度 M ,而 $T_p \gg MT$ 导致多个相

关峰位置处 SBS 的放大,无法通过对输出信号的单个时序进行时域分析和分离。因此,该系统采用了差分脉冲对方案^[78],每条时序由持续时间不同的一对泵浦脉冲光(T_p 和 $T_p + \Delta T_p$)采集两次,且差分脉冲宽度 ΔT_p 小于相位码周期 MT ;利用差分时序即可恢复单个相关峰位置处的 SBS 增益,从而实现明确的测量。实验结果如图 16 所示,相位码的码长 $M=11$,使用 11 对时序即可测量全部的 1600 个分辨点,扫描次数减少了一个数量级,最终在 43 m 长的待测光纤上实现了空间分辨率为 2.7 cm 的分布式测量,这是目前为止 BOCDA 系统中得到的最少的相关峰位置扫描次数。

3) 频率扫描的消除

传统的分布式布里渊光纤传感通常通过扫描探测光的频率实现布里渊增益谱的稳态解调,虽然测量精度较高,但耗时的扫频过程导致难以实现高速实时的分布式测量。

2016 年,Preter 等^[79]提出利用探测光功率的瞬态分析来提取 BFS,该方案不需要扫频即可大幅缩短系统测量时间。输出探测光的瞬时功率可以利用

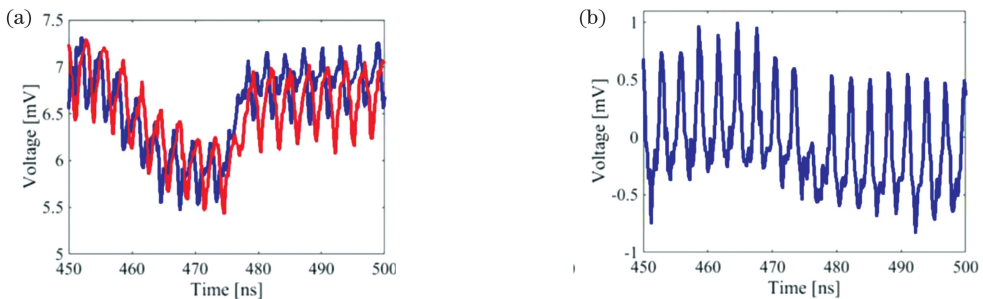


图 16 双脉冲对分析的结果^[77]。(a)输出信号的测量结果；(b)两条时序相减的结果

Fig. 16 Results of double-pulse pair analysis^[77]. (a) Measurement results of output signal; (b) result of subtraction between two traces

瞬时增益系数 $g(t', \Omega)$ 表示为 $|A_s(z=0, t')|^2 = |A_{s0}|^2 \exp[g(t', \Delta\Omega) |A_{p0}|^2 L]$, 其中 $g(t', \Omega)$ 由光纤布里渊频移 Ω_B 与泵浦光和探测光的频差 $\Delta\Omega$ 决定, $\Delta\Omega = \Omega_B - \Omega$, 因此有

$$g(t', \Delta\Omega) = g_{ss}(\Delta\Omega) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_B t'}{2}\right) \left[\cos(\Delta\Omega t') - \frac{2\Delta\Omega}{\Gamma_B} \sin(\Delta\Omega t') \right] \right\}, \quad (17)$$

式中: $g_{ss}(\Delta\Omega)$ 为稳态增益系数, 且(17)式在 $0 \leq$

$t' \leq T_p$ 时是有效的。在瞬态分析中, 泵浦光和探测光的频差设置为 $\Delta\Omega \approx \Omega_B$, 并测量输出探测光的瞬时功率; 测得的时序 $g(t')$ 与由(17)式计算的参考函数互相关, 据此可确定最符合实验结果的 $\Delta\Omega$, 因而无需扫频就可以得到未知的 BFS。实验结果如图 17 所示, 引入传统的布里渊传感进行对比, 利用瞬态分析得到的 BFS 估计值与稳态测量获得的 BFS 估计值在数量上一致, 且系统的空间分辨率为 4 cm。

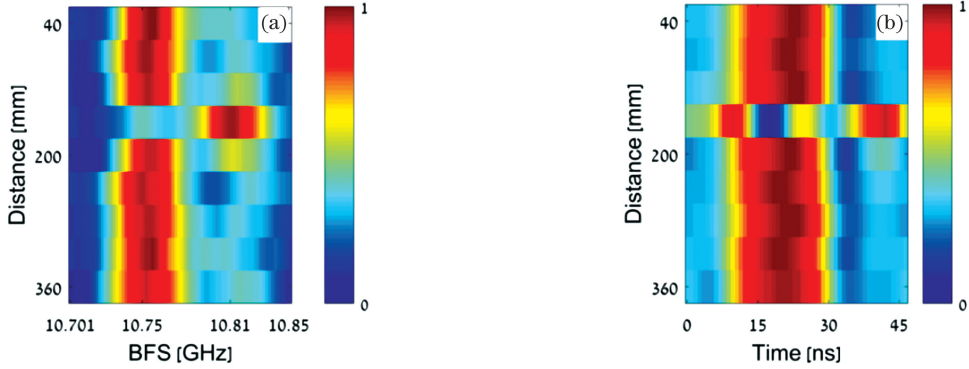


图 17 测量的归一化稳态和瞬态布里渊增益^[79]。(a)测量的归一化稳态布里渊增益; (b)测量的归一化瞬态布里渊增益

Fig. 17 Measured normalized steady-state and transient Brillouin gains^[79]. (a) Measured normalized steady-state Brillouin gain; (b) measured normalized transient Brillouin gain

4.3 发展历程总结

图 18 为 Phase-coded BOCDA 系统的发展历程。

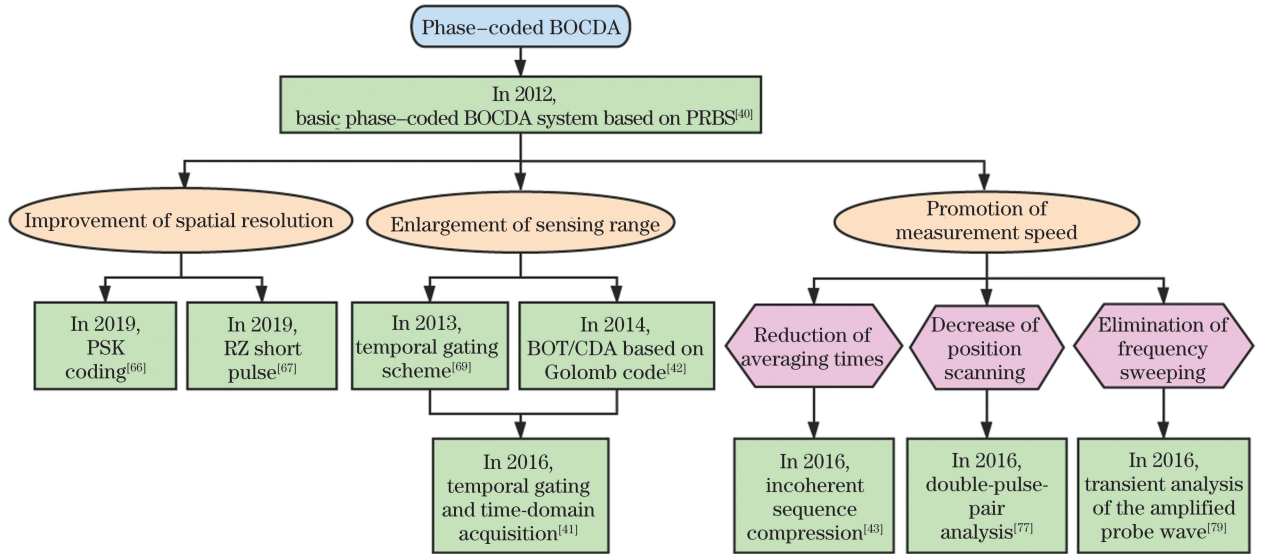


图 18 Phase-coded BOCDA 系统的发展历程

Fig. 18 Development process of phase-coded BOCDA system

5 宽带光源型 BOCDA

5.1 基于 ASE 光源的 BOCDA 系统

传统 BOCDA 系统利用宽带调制来降低光源的

相干性, 要想进一步提高空间分辨率, 需要更高的调制速率以及高性能的微波源, 但是面向 100 GHz 的微波源和电光调制器件是很少有的。2014 年, Cohen 等^[38] 在实验中采用宽带 ASE 信号, 该方案

可不受外部调制器件的带宽限制,可提供高空间分辨率。此方案中,ASE 光源的带宽为 $\Delta\nu_{in}$,相干时间 $\tau_c^{in} \approx 1/\Delta\nu_{in}$ 。声波场被限制在光纤上 $\Delta z \approx 1/(2V_g\tau_c^{in})$ 的范围内。实验中,为消除探测光的调制边带在光谱上重叠引入的噪声,将带宽为 $\Delta\nu_{out} < \Delta\nu_{int}$ 的光带通滤波器放置在待测光纤输出端,只保留被 SBS 放大的信号光。

ASE 光源的输出可以描述为随机遍历过程。使用积分时间为 T 的光电探测器对输出探测光进行测量,测量的信噪比可以估计为

$$R_{SNR} \approx \frac{1}{2}g_0V_g \frac{|A_{p0}|^2}{\Delta\nu_{in}} \sqrt{\frac{\Delta\nu_{out}}{B}}, \quad (18)$$

式中: g_0 是待测光纤的 SBS 增益系数; $B=1/T$ 是光电探测器的积分带宽。该方案单次采集时序的预期 SNR 非常低,约为 0.05,需将大量重复测量结果进行平均以提高 SNR。

图 19(a)是基于 ASE 光源的高分辨率 BOCDA

的实验装置,图 19(b)是测得的布里渊频移的分布^[80]。泵浦光和探测光均来自掺铒光纤放大器滤波后的放大自发辐射, $\Delta\nu_{in}=25$ GHz,对应于 $\Delta z=4$ mm 的理论空间分辨率。待测光纤输出端的探测光通过一个 9 GHz 带宽的光带通滤波器。通过可变光延迟线在 5 cm 的范围内扫描相关峰的位置。对单个频率下的时序重复测量 4096 次,最终实现了 4 mm 的空间分辨率,但是传感距离仅为 5 cm;可以使用高非线性光纤增强局部布里渊放大,以实现 1 mm 或更小的空间分辨率,该方案可用于亚毫米级超精细结构的健康监测。

此外,ASE 信号独有的光源特性,如输出探测光功率波动、光谱宽引起的光谱重叠、低功率谱密度,导致系统信噪比很低、传感距离十分受限。另外,ASE 信号的唯一相关峰定位需要利用可变光延迟线进行手动位置扫描,使得系统的实际应用受到很大限制。

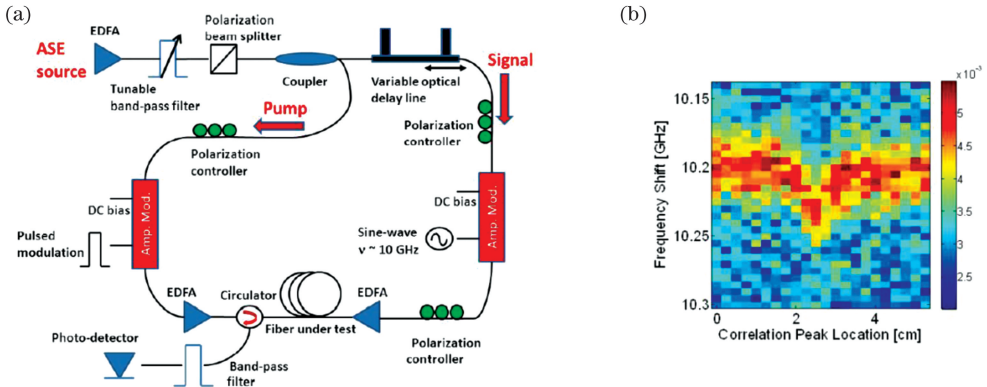


图 19 基于 ASE 光源的 BOCDA 系统的实验装置和测得的布里渊频移的分布^[80]。(a)实验装置;(b)测得的布里渊频移的分布

Fig. 19 Experimental setup of BOCDA system based on ASE source, and distribution of measured BFS^[80]. (a) Experimental setup; (b) distribution of measured BFS

5.2 基于混沌激光的 BOCDA 系统

5.2.1 基本原理

本课题组提出的混沌 BOCDA 技术是另一种具有竞争力的宽带光源型系统。混沌激光具有宽带的特性,理论上可实现与混沌激光带宽成反比的毫米级空间分辨率;此外,混沌激光还具有类噪声特性和强抗干扰特性,这些都使得混沌激光可以作为分布式传感系统的理想信号源,实现长距离、高精度且空间分辨率与传感距离无关的测量。

混沌泵浦光和探测光分别从待测光纤的两端入射。根据电致伸缩原理,两个光发生干涉导致了声波场的移动^[81-82],位置 z 处声波场大小的期望值

(对于 $t \gg \tau$)为

$$\overline{Q(z, t)} = \frac{1}{2\tau} \int_0^t \exp\left(\frac{t'-t}{2\tau}\right) A_p\left(t' - \frac{z}{V_g}\right) A_s^* \left[t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z)\right] dt', \quad (19)$$

式中: $A_p\left(t' - \frac{z}{V_g}\right) A_s^* \left[t' - \frac{z}{V_g} + \theta(z)\right] = C[\theta(z)]$ 是混沌泵浦光和探测光之间的互相关函数。当 $\theta(z)=0$ 时, $C[\theta(z)]$ 为混沌泵浦光和探测光的自相关函数,且其自相关曲线为类 δ 函数型。

图 20 是混沌激光的自相关曲线,在整个曲线中仅有一个主相关峰。仅在该相关峰内,混沌泵浦光和具有相同混沌状态的探测光之间才会发生 SBS

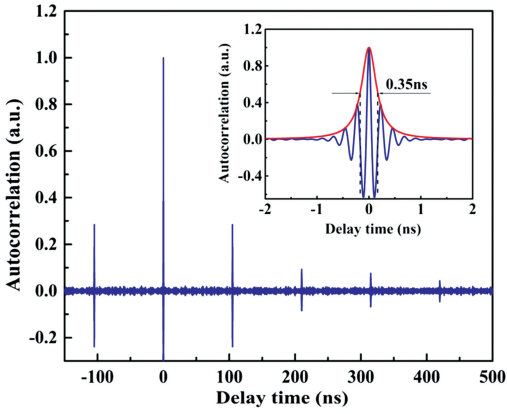


图 20 混沌激光的自相关曲线^[83]

Fig. 20 Autocorrelation curve of chaotic laser^[83]

相互作用。因此,理论上系统的空间分辨率可由相关峰的半峰全宽决定^[45]。图 20 的插图为主相关峰的放大图,主相关峰内出现了一些轻微波动和激光弛豫周期振荡现象,主相关峰两侧还

存在一些呈周期分布的次峰,这是由混沌信号固有的时延特征导致的^[81],此时周期等于混沌激光源外腔腔长对应的反馈时间。这些次峰的存在会在 FUT 中激发非峰值 SBS 放大,随着光纤长度的累积,布里渊增益谱的背景噪声增大,这限制了测量范围的扩大。

5.2.2 混沌 BOCDA 的发展

1) 基本混沌 BOCDA 系统

2018 年,本课题组提出了混沌 BOCDA 系统,实验装置如图 21 所示^[83]。如虚线框中所示,混沌激光源采用单反馈结构,通过调节可变衰减器(VA)和偏振控制器(PC1)获得适当的光反馈以驱动 DFB-LD 进入混沌振荡状态。实验中使用数字光功率计(OPM)进行功率采集并测量 BGS。该系统中的相关峰是唯一的,通过调节探测路上的可变光延迟线可对相关峰的位置在待测光纤范围内进行扫描,实现光纤沿线的分布式测量。

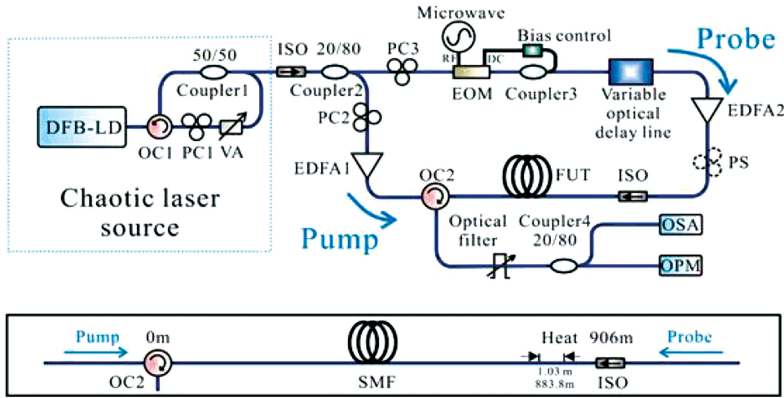


图 21 混沌 BOCDA 的实验装置^[83]

Fig. 21 Experimental setup of chaos-based BOCDA^[83]

由于混沌激光具有类噪声特性,Chaos-based BOCDA 系统与 ASE-based BOCDA 系统^[38]有相似的传感性能,可以将混沌 BOCDA 系统的信噪比估计为

$$R_{SNR} \approx \frac{1}{2} g_0 V_g |A_{p0}|^2 \sqrt{T/f_B}, \quad (20)$$

式中: f_B 为混沌激光带宽; T 为积分球功率传感器的响应时间。预期的 SNR 约为 0.6。Chaos-based BOCDA 系统的 SNR 相比 ASE-based BOCDA 系统得到明显提升,但仍需多次重复测量以继续提高 SNR。

图 22(a) 所示为 FUT 沿线的 BGS 三维分布图,由该图可以清楚地辨别出接近 884 m 处 1 m 长的加热光纤。根据图 22(b) 中加热光纤段的 10%~

90% 上升和下降距离的平均值计算的空间分辨率可达 4 cm。根据高斯拟合的主相关峰的半峰全宽,理论空间分辨率为 3.5 cm。实验获得的空间分辨率与理论预期的一致。然而该方案受到自相关旁瓣及非零均值等噪声因素的影响,传感距离仅为 906 m;且本实验所采用混沌激光的信号带宽仅为 2 GHz,混沌激光的宽带特性未被充分利用。因此,本课题组深入研究基于时延特征抑制及带宽增强型混沌信号的 BOCDA 技术,以期实现长距离高分辨率的传感系统。

2) 空间分辨率的提高

混沌光具有宽带低相干特性,而且可以通过控制反馈强度(即反馈光与 DFB 激光器自由输出时的功率比)来调节混沌激光的相干长度^[84],因此混沌

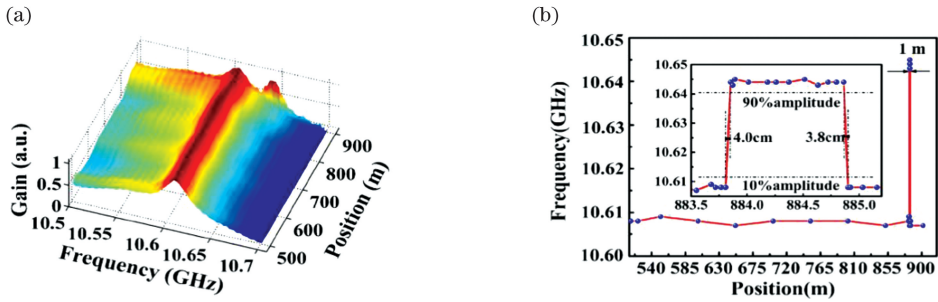


图 22 分布式温度传感测量结果^[83]。(a)待测光纤沿线的布里渊增益谱分布；(b)待测光纤沿线的布里渊频移量分布
Fig. 22 Distributed temperature sensing measurement results^[83]. (a) Distribution of BGS along FUT; (b) distribution of BFS along FUT

BOCDA 系统容易实现高空间分辨率。2018 年,本课题组提出了基于宽带混沌激光的毫米级高分辨率混沌 BOCDA 系统^[45]。实验中通过改变反馈光的偏振匹配态及反馈强度得到不同的混沌状态,图 23 所示为不同状态下混沌激光的典型特征图。随着混

沌带宽从 3 GHz 增加至 10 GHz,自相关曲线中心峰的半峰全宽逐渐减小,最终在 10 GHz 带宽混沌中得到 0.03 ns 的中心峰,此时系统的理论空间分辨率可达 3 mm,而且时延特征得到最大程度的抑制。

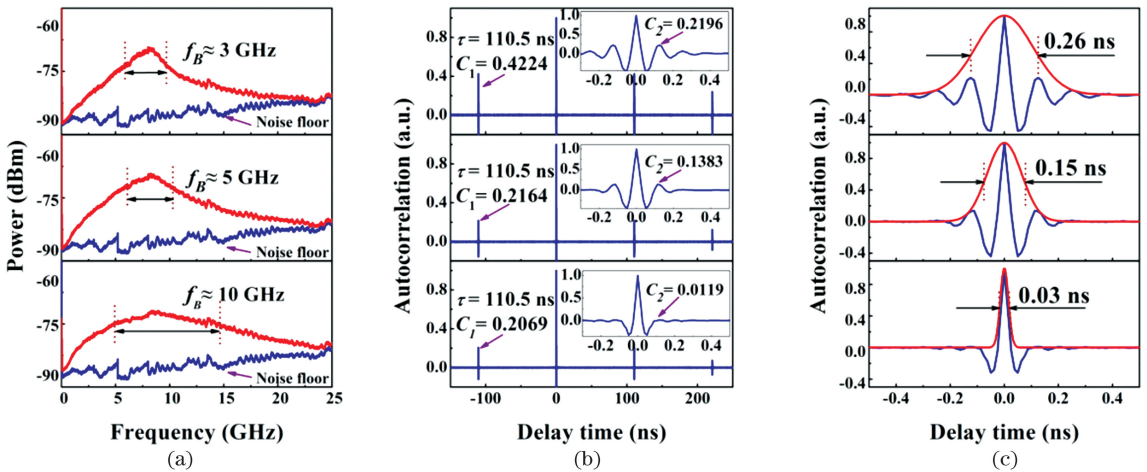


图 23 三种典型状态下混沌激光特性图^[45]。(a)频谱；(b)自相关曲线；(c)高斯拟合的相关峰
Fig. 23 Characteristic diagrams of chaotic laser in three typical states^[45]. (a) RF spectra; (b) autocorrelation traces; (c) correlation peaks with Gauss fitting

随着泵浦光和探测光在光纤中相互作用产生的相关峰变窄,光纤中因受激发产生较弱的受激布里渊增益信号;而且混沌信号非中心峰引起的 SBS 放大会引入额外的噪声,噪声沿光纤传播过程中不断积累。因此,毫米尺度的相关峰内激发的微弱受激布里渊增益信号极易被噪声淹没,严重影响系统性能。为继续提升系统 SNR 且缩短测量时间,该方案采用锁相探测来提取布里渊增益信号,具有更高信噪比和更快的采集速度,不需要进行多次平均,测量时间大幅减少。图 24 是分布式应变传感的测量结果,该方案实现了 165 m 的测量范围和 3.5 mm 的空间分辨率,这是目前基于宽带光源 BOCDA 系统实现的最高空间分辨率。

3)测量范围的扩大
与 ASE 光源相比,混沌激光具有更高的光谱密度,并且在相同带宽下具有更高的输出功率,因此混沌 BOCDA 系统可实现更长的传感距离。然而,混沌半导体激光器产生的混沌激光具有时延特征(TDS),TDS 产生的次峰会加大 BGS 的背景噪声,限制系统的测量范围。2018 年,本课题组分析了混沌半导体激光器的偏置电流和反馈强度对混沌激光 TDS 抑制的影响,通过优化这两个参数,将可较好地抑制 TDS 的混沌激光应用于混沌 BOCDA 系统,最终在 3.2 km 长的待测光纤上实现了空间分辨率为 7.4 cm 的分布式测量^[85]。

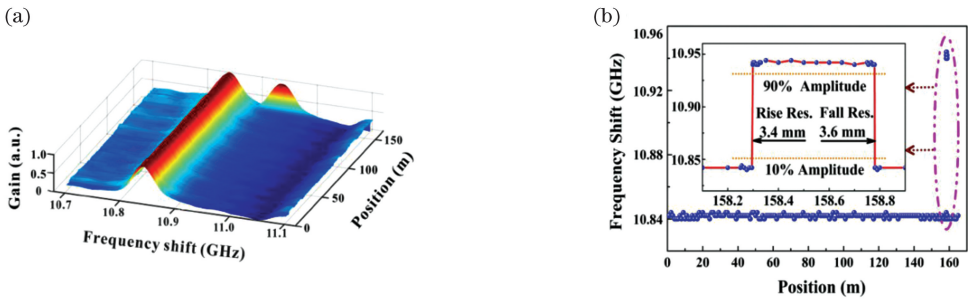


图 24 宽带混沌 BOCDA 系统的分布式应变传感的测量结果^[45]。(a)待测光纤沿线的布里渊增益谱分布；(b)待测光纤沿线的布里渊频移量分布

Fig. 24 Distributed strain sensing measurement results of broadband chaos-based BOCDA system^[45]. (a) Distribution of BGS along FUT; (b) distribution of BFS along FUT

但是,上述系统的 TDS 并未完全消除,仍存在随光纤长度不断累积的背景噪声,测量范围依然受限。2018 年,本课题组引入了时域门控方案,利用脉冲信号对泵浦光进行强度调制,脉冲持续时间 T_p 大于声子寿命 τ ^[86]。与时域门控 Phase-coded BOCDA 类似,该方案中的相关峰被限制在脉冲持续时间 T_p 内。从图 25(a)的自相关曲线可以看出,

通过脉冲调制,混沌时延位置处的旁瓣峰值得到降低,自相关曲线噪声基底被部分抑制,光纤中不断累积的微弱声栅被抑制,因此系统噪声基底被大幅抑制,测量范围得到大幅扩大。图 25(b)所示为 FUT 沿线的 BGS 三维分布图,该方案在 10.2 km 长的传感光纤上实现了空间分辨率为 9 cm 的分布式温度传感。

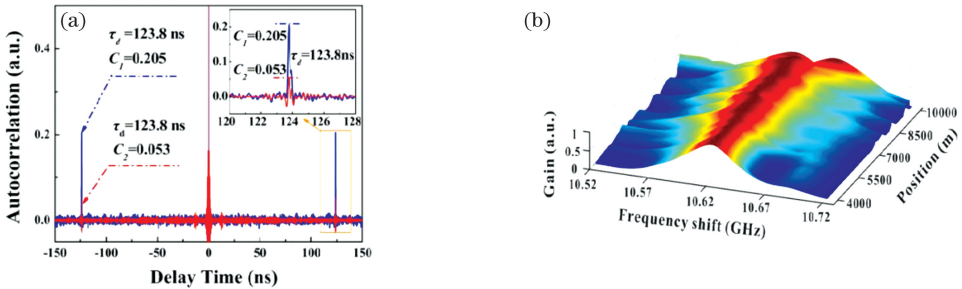


图 25 混沌泵浦光的自相关特性和分布式温度传感的测量结果^[86]。(a)脉冲调制前后混沌泵浦光的自相关特性；(b)分布式温度传感的测量结果

Fig. 25 Autocorrelation characteristics of chaotic pump and measurement result of distributed temperature sensing^[86].

(a) Autocorrelation characteristics of chaotic pump light with and without amplitude pulse modulation; (b) measurement result of distributed temperature sensing

5.2.3 混沌 BOCDA 系统的讨论

混沌 BOCDA 的主要优点是通过混沌带宽从理论上确定空间分辨率,而无需复杂的调制手段和调制器件。混沌光的宽带低相干特性使得空间分辨率很容易达到毫米量级,而且空间分辨率与传感距离无关,因此混沌 BOCDA 系统成为能同时兼顾高空间分辨率和长传感距离的优选方案。混沌 BOCDA 在单光反馈回路中很容易获得 10 GHz 的宽带混沌。此外,本课题组已经通过实验验证了 50 GHz 的带宽增强型混沌激光的产生^[87-88],理论上可以达到亚毫米级的分辨率。具体实施时,还可以采用高非线性光纤段来增强局部布里渊放大,以期在毫米

级或更短的光纤段上获得更高的 SBS 功率增益。此外,相比于上述实验中使用的分立型混沌激光源,光子集成混沌半导体激光器^[89]的成功研制为混沌 BOCDA 系统提供了更加简单、轻便、易集成的信号源,混沌 BOCDA 系统的样机研制与工程化应用逐步走向可能。

此外,目前混沌 BOCDA 的主要缺点是通过可编程光延迟线扫描单个相关峰的位置,实现分布式测量,这导致了系统使用的不便和耗时。为了避免可编程光延迟线在使用上的局限性,可以利用混沌光时域反射技术^[90]来实现光纤沿线定位,进一步探索在时域内解调相关峰的方法,从而构建可同时访

问多个相关峰以显著减少测量时间的混沌 BOCDA 系统。

5.3 发展历程总结

图 26 为宽带光源型 BOCDA 系统的发展过程。

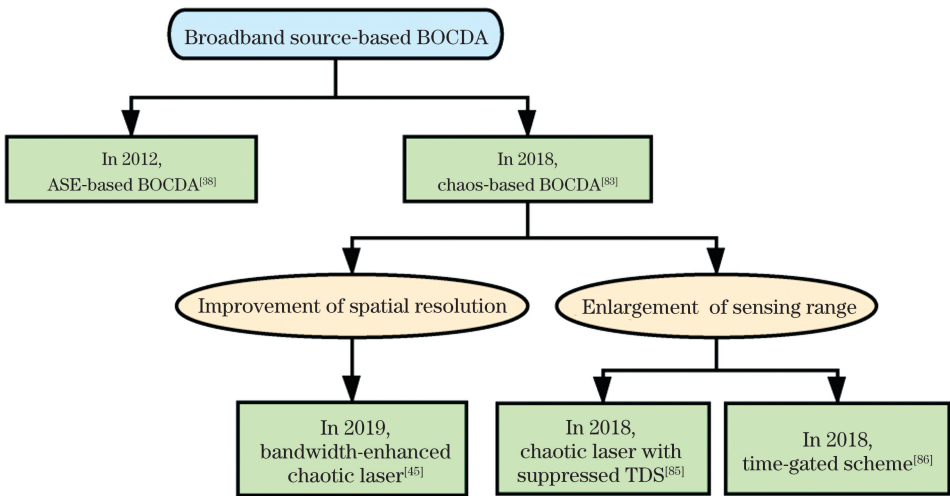


图 26 宽带光源型 BOCDA 系统的发展过程

Fig. 26 Development process of broadband source-based BOCDA system

6 结束语

分布式光纤传感技术由于可以实现温度/应变的分布式测量而受到广泛关注,尤其是基于受激布里渊散射的 BOCDA 系统,其具有高空间分辨率、高速测量和可随机访问测量位置的独特优势,具有极高的潜在应用价值。从受激布里渊散射出发,分析了 BOCDA 的基本原理,然后综述了近年来 BOCDA 系统的发展,包括正弦频率调制型 BOCDA 系统、相位调制型 BOCDA 系统以及宽带光源型 BOCDA 系统,其中宽带光源包括 ASE 信号和混沌激光。具体分析了 BOCDA 技术在传感距离、空间分辨率以及测量速度等方面的限制因素,并阐述了研究者们采取的性能改善措施。目前 BOCDA 系统的空间分辨率已达到 0.64 mm,传感距离可达 17.5 km,且一种免扫频的瞬时 SBS 增益分析模型也被提出以用于提高系统测量速度。然而,本文所涉及的方案均为静态温度/应变的测量,在现代工业中,对动态分布式参量测量的需求不断增强。因此,实现长距离精准定位和高速实时监测将会成为 BOCDA 技术的重要发展方向。目前,国内外研究者们已经在这些方向取得了一些进展,包括快速扫频和斜坡辅助的动态测量技术等^[91-94],而动态应变范围、振动频率有待进一步研究。综上所述,随着各种技术的不断突破,BOCDA 将向着长传感距离、高空间分辨率和高速实时测量的方向发展,在现代工

业、土木工程健康监测等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Bao X Y, Webb D J, Jackson D A. Recent progress in distributed fiber optic sensors based upon Brillouin scattering[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2507: 175-185.
- [3] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [4] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [5] Barrias A, Casas J R, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(5): 748.
- [6] Ukil A, Braendle H, Krippner P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 885-892.
- [7] Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 700-719.
- [8] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, et al. Application of distributed fiber sensing in fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080006.

- 周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080006.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 6100407.
- [12] Shimizu K, Horiguchi T, Koyamada Y, et al. Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber [J]. Optics Letters, 1993, 18(3): 185-187.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. Applied Optics, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [17] Hu J, Zhang X P, Yao Y G, et al. A BOTDA with break interrogation function over 72 km sensing length[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 145-153.
- [18] Xu P B, Dong Y K, Zhang J W, et al. Bend-insensitive distributed sensing in singlemode-multimode-singlemode optical fiber structure by using Brillouin optical time-domain analysis [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22714-22722.
- [19] 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.
- [20] Hotate K. Recent achievements in BOCDA/BOCDR [C]//13th IEEE Sensors Conference, November 2-5, 2014. Valencia, Spain. New York: IEEE Press, 2014: 14862415.
- [21] 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): 6802807.
- [22] Mizuno Y, Hayashi N, Fukuda H, et al. Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(12): e16184.
- [23] 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.
- [24] Hotate K. Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 700-719.
- [25] 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.
- [26] 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]//CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 03TH8671), December 15-19, 2003, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2003: 7993564.
- [27] 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. May 16-21, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 8281648.
- [28] Zadok A, Antman Y, Primerov N, et al. Random-access distributed fiber sensing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): L1-L5.
- [29] Song K Y, Hotate K. Distributed fiber strain sensor with 1-kHz sampling rate based on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(23): 1928-1930.
- [30] Mizuno Y, He Z Y, Hotate K. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9040-9046.
- [31] Boyd R W. Nonlinear optics [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2007.

- [32] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2007.
- [33] 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, 2000, 83(3): 405-412.
- [34] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Agrawal G P. Principles and applications of nonlinear fiber optics [M]. Jia D F, Yu Z H, et al, Transl. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 245-265.
Agrawal Govind P. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹, 等, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 245-265.
- [38] 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.
- [39] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(6): 1321-1324.
- [40] Zadok A, Antman Y, Primerov N, et al. Random-access distributed fiber sensing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): L1-L5.
- [41] 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(5): e16074.
- [42] Elooz 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Song K Y, He Z Y, Hotate K. Effects of intensity modulation of light source on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(5): 1238-1246.
- [47] Jeong J H, Lee K, Song K Y, et al. Differential measurement scheme for Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27094-27101.
- [48] Hotate K. A correlation-based continuous-wave technique for measuring Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber with centimeter-order spatial resolution [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4185: 418509.
- [49] Song K Y, Hotate K. Enlargement of measurement range in a Brillouin optical correlation domain analysis system using double lock-in amplifiers and a single-sideband modulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(3): 499-501.
- [50] 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.
- [51] Song K Y, He Z Y, Hotate K. Brillouin optical correlation domain analysis system with kilometer measurement range based on intensity modulation scheme [C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006: 1-2.
- [52] Song K Y, He Z Y, Hotate K. Optimization of Brillouin optical correlation domain analysis system based on intensity modulation scheme [J]. Optics Express, 2006, 14(10): 4256-4263.

- [53] Wang B, Fan X Y, Fu Y X, et al. Enhancement of strain/temperature measurement range and spatial resolution in Brillouin optical correlation domain analysis based on convexity extraction algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32128-32136.
- [54] Lee H, Mizuno Y, Nakamura K. Detection of 2-mm-long strained section in silica fiber using slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(2): 020303.
- [55] Mizuno Y, He Z Y, Hotate K. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme[J]. Optics Express, 2009, 17(11): 9040-9046.
- [56] Wang B, Fan X Y, Liu Q W, et al. Increasing effective sensing points of Brillouin optical correlation domain analysis using four-wave-mixing process[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1032: 103238K.
- [57] Jeong J H, Lee K I, Jeong J M, et al. Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation domain analysis using multiple correlation peaks[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2012, 16(3): 210-214.
- [58] Jeong J H, Lee K, Song K Y, et al. Bidirectional measurement for Brillouin optical correlation domain analysis[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11091-11096.
- [59] Jeong J H, Lee S B, Jhon Y M, et al. Extension of measurement range in Brillouin optical correlation domain analysis by pump-probe switching [J]. Applied Physics B, 2014, 116(1): 91-96.
- [60] Hotate K, Arai H. Enlargement of measurement range of simplified BOCDA fiber-optic distributed strain sensing system using a temporal gating scheme [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 184-187.
- [61] Hotate K, Arai H, Song K Y. Range-enlargement of simplified Brillouin optical correlation domain analysis based on a temporal gating scheme[J]. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2008, 1(4): 271-274.
- [62] 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.
- [63] Ryu G, Kim G T, Song K Y, et al. BOCDA system enhanced by concurrent interrogation of multiple correlation peaks with a 10 km sensing range[C]// 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), April 24-28, 2017, Jeju, South Korea. New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [64] Antman Y, Primerov N, Sancho J, et al. Localized and stationary dynamic gratings via stimulated Brillouin scattering with phase modulated pumps[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7807-7821.
- [65] Antman Y, Levanon N, Zadok A. Low-noise delays from dynamic Brillouin gratings based on perfect Golomb coding of pump waves[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5259-5261.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] Zhang M J, Bao X Y, Chai J, et al. Impact of Brillouin amplification on the spatial resolution of noise-correlated Brillouin optical reflectometry [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 080603.
- [69] Denisov A, Soto M A, Thevenaz L. Time gated phase-correlation distributed Brillouin fiber sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8794: 87943I.
- [70] Antman Y, Yaron L, Langer T, et al. Experimental demonstration of localized Brillouin gratings with low off-peak reflectivity established by perfect Golomb codes[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4701-4704.
- [71] Golomb S W. Two-valued sequences with perfect periodic autocorrelation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 383-386.
- [72] Antman Y, Yaron L, Langer T, et al. Variable delay of Gbit/s data using coded Brillouin dynamic gratings [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8998: 89980W.
- [73] Elooz D, Antman Y, Zadok A. Combined time-domain and correlation-domain Brillouin analysis with 1600 meters range and 2 centimeters resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91576O.
- [74] Denisov A, Soto M A, Thevenaz L. 1000000 resolved points along a Brillouin distributed fibre sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 9157D2.
- [75] London Y, Antman Y, Cohen R, et al. High-resolution long-range distributed Brillouin analysis using dual-layer phase and amplitude coding [J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27144-27158.
- [76] Levanon N, Cohen I, Arbel N, et al. Non-coherent pulse compression-a-periodic and periodic waveforms [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(1): 216-224.

- [77] Shlomi O, Preter E, Ba D, et al. Double-pulse pair Brillouin optical correlation-domain analysis [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26867-26876.
- [78] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. Applied Optics, 2012, 51(9): 1229-1235.
- [79] 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.
- [80] Cohen R, London Y, Antman Y, et al. Few millimeter-resolution Brillouin optical correlation domain analysis using amplified-spontaneous-emission pump and signal waves [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91576B.
- [81] Santagiustina M, Ursini L. Dynamic Brillouin gratings permanently sustained by chaotic lasers [J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 893-895.
- [82] Zhang J Z, Li Z P, Zhang M J, et al. Characterization of Brillouin dynamic grating based on chaotic laser [J]. Optics Communications, 2017, 396: 210-215.
- [83] 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.
- [84] Wang Y C, Kong L Q, Wang A B, et al. Coherence length tunable semiconductor laser with optical feedback [J]. Applied Optics, 2009, 48(5): 969-973.
- [85] 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.
- [86] Zhang J, Wang Y, Zhang M, et al. Time-gated chaotic Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17597-17607.
- [87] Qiao L, Lü T, Xu Y, et al. Generation of flat wideband chaos based on mutual injection of semiconductor lasers [J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5394-5397.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] Dong X Y, Wang A B, Zhang J G, et al. Combined attenuation and high-resolution fault measurements using Chaos-OTDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 684006.
- [91] Zhang C Y, Kishi M, Hotate K. 5,000 points/s high-speed random accessibility for dynamic strain measurement at arbitrary multiple points along a fiber by Brillouin optical correlation domain analysis [J]. Applied Physics Express, 2015, 8(4): 042501.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] 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.

Research Progress in Brillouin Optical Correlation Domain Analysis Technology

Hu Xinxin¹, Wang Yahui^{1,2}, Zhao Le², Zhang Qian², Zhang Mingjiang^{1,2*},
Zhang Jianzhong^{1,2}, Qiao Lijun¹, Wang Tao¹, Gao Shaohua²

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

²College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract

Significance The distributed optical fiber sensor based on Brillouin scattering can continuously measure temperature or strain along the optical fiber and has become a research hotspot at home and abroad. Currently, it is widely used in many fields such as modern industries, civil structural health monitoring, and national defense security. There are four main types of Brillouin distributed optical fiber sensing technologies: Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR), Brillouin optical time domain analysis (BOTDA), Brillouin optical correlation domain reflectometry (BOCDR), and Brillouin optical correlation domain analysis (BOCDA). Among them, the BOCDA has the unique advantages of high spatial resolution, high-speed measurement, and random accessibility of measuring position, so it has extremely high potential application value. According to their different operating principles, this paper reviews the research progress of sine-frequency-modulation BOCDA (sine-FM BOCDA), phase-coded BOCDA, and broadband-source-based BOCDA in recent years. Broadband-source-based BOCDA includes amplified-spontaneous-emission-based BOCDA (ASE-based BOCDA) and chaos-based BOCDA, and the latter is proposed by our group. Additionally, in view of their limiting factors of sensing distance, spatial resolution, and measurement speed, the performance improvement of these BOCDA technologies is analyzed, and their future developments are also prospected.

Progress The BOCDA is a novel distributed sensing method based on stimulated Brillouin scattering (SBS). The interference of the pump wave and the counter-propagating probe wave results in stimulated Brillouin acoustic field through electrostriction effect. The two waves are modulated in phase or frequency by the same waveform, and their frequencies are detuned around the Brillouin frequency offset of the fiber. The magnitude of the SBS acoustic field is stimulated at a specific position referred as correlation peak (CP), and the spatial resolution is only determined by the full-width at half-maximum (FWHM) of the CP (Fig. 1). Consequently, compared to time-domain technology with inherent predicament of 1-m-spatial resolution, the correlation-based method does not suffer from the spatial resolution limitation. For the sine-FM BOCDA, the highest spatial resolution (1.6 mm) is achieved by applying the beat lock-in detection scheme, but the sensing distance is limited to less than 5 m (Fig. 4). In order to increase the sensing distance, a differential measurement scheme with dual modulation and temporal gating is proposed to achieve a measurement range of 10.5 km, but the measurement time is too long [Fig. 7 (b)]. Later, time-domain data processing is proposed in the differential measurement BOCDA system, which effectively improves the measurement speed of the system (Fig. 8). For the phase-coded BOCDA, by using the short optical pulse source modulated by the pseudorandom sequence (PRBS), a highest spatial resolution (0.64 mm) of the current BOCDA system is realized (Fig. 13). By using Golomb codes to replace PRBS and applying temporal gating, the coding noise is effectively suppressed (Fig. 14), and then the optimal phase-coded BOCDA system based on temporal gating is proposed, by which the longest sensing distance (17.5 km) and the maximum number of resolution points (beyond 10^6) are achieved. The improvement of the measurement speed of the phase-coded BOCDA system is mainly studied from three aspects: the decrease of the number of averaging (incoherent sequence compression, Fig. 15), the reduction of the position addressing (double-pulse-pair analysis, Fig. 16), and the elimination of frequency scanning (transient SBS gain analysis without spectral scanning, Fig. 17). Therefore, the measurement speed is significantly promoted, and the dynamic monitoring could be further explored. For the broadband-source-based BOCDA, the millimeter-level spatial resolution could be easily achieved because the FWHM of the CP is determined by the source bandwidth. Consequently, spatial resolution of 4 mm is realized with ASE source of 25 GHz despite that the sensing distance is only 5 cm (Fig. 19). In order to get better performance, the chaos-based BOCDA is proposed by our group, higher resolution of 3.5 mm is achieved with chaotic laser of 10 GHz, and the sensing distance reaches 165 m (Figs. 23–24).

Moreover, by suppressing the time delay signature and using the time-gated scheme, the noise background is largely inhibited, and the sensing distance is greatly improved to 10.2 km with a spatial resolution of 9 cm (Fig. 25).

Conclusion and Prospect The sine-FM BOCDA system is easy to achieve high spatial resolution by adjusting higher modulation amplitude and has preferable signal-to-noise ratio (SNR). However, the direct modulation of semiconductor laser induces frequency modulation superimposed on amplitude modulation through carrier density modulation and temperature change effects, which leads to a predicament that is hardly to set both modulation frequency and modulation amplitude at a higher bandwidth simultaneously. In order to obtain mm-order spatial resolution, a special laser diode (LD), three-electrode LD, is used as light source, and intensity modulation (IM) is used synchronously to compensate for intensity chirp, which leads to complexity and high cost of the system. Phase-coded BOCDA system combines long sensing distance with high spatial resolution, and the measurement speed is also greatly improved. The off-peak Brillouin interactions will introduce coding noise and degrade the sensing performance of the system, although the application of Golomb codes and temporal gating has effectively improved the SNR. In addition, to obtain a higher spatial resolution, a higher modulation rate is required, but high-performance modulation devices are seldom available, which will further increase the cost and the complexity of the system. The spatial resolution of the broadband-source-based BOCDA system can easily reach millimeter level. However, the ASE-based BOCDA system has poor SNR and the sensing distance is largely limited. In the chaos-based BOCDA, the spatial resolution is theoretically determined by the chaotic bandwidth. The chaos of 10 GHz is easily obtained, and the sensing distance is successfully extended to 10.2 km. However, the main weakness of the current chaos-based BOCDA is the location of a single CP scanned by the variable delay line, which results in a time-consuming system and poor practicability. In general, these BOCDA technologies involved in this paper have made a significant progress and they have been used for static temperature or strain measurement. In modern industry, the demand for distributed measurement of dynamic parameter continues to increase. Domestic and foreign researchers have made some progresses in these aspects, including fast frequency sweeping and slope-assisted method, but the dynamic strain range and vibration frequency still have great potential for development. In summary, the BOCDA will develop in the direction of long sensing distance, high spatial resolution, and high-speed real-time measurement, and has broad application prospects in modern industry and civil structural health monitoring.

Key words fiber optics; fiber sensors; Brillouin scattering; Brillouin optical correlation domain analysis; distributed fiber sensing

OCIS codes 060.2370; 060.4370; 060.2300; 060.2330