

毫米级高分辨率的混沌激光分布式光纤测温技术

张倩 王亚辉 张明江 张建忠 乔丽君 王涛 赵乐

Distributed temperature measurement with millimeter-level high spatial resolution based on chaotic laser

Zhang Qian Wang Ya-Hui Zhang Ming-Jiang Zhang Jian-Zhong Qiao Li-Jun Wang Tao Zhao Le

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 104208 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190018>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光纤色散相位补偿的高分辨率激光频率扫描干涉测量研究

High-resolution laser frequency scanning interferometer based on fiber dispersion phase compensation

物理学报. 2015, 64(21): 219501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.219501>

面向地壳形变观测的超高分辨率光纤应变传感系统

Ultrahigh resolution fiber optic strain sensing system for crustal deformation observation

物理学报. 2017, 66(7): 074208 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074208>

分布式光纤Sagnac干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

物理学报. 2016, 65(4): 044210 <https://doi.org/10.7498/aps.65.044210>

大幅度增加弛豫振荡频率来实现毫米级外腔半导体激光器的外腔机制转换

Conversion of external cavity mechanism of millimeter-level external cavity semiconductor laser by significantly increasing relaxation oscillation frequency

物理学报. 2017, 66(23): 234204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234204>

台风彩虹（2015）高分辨率数值模拟及涡旋Rossby波特征分析

High resolution numerical simulation of typhoon Mujigae (2015) and analysis of vortex Rossby waves

物理学报. 2017, 66(8): 089201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.089201>

毫米级高分辨率的混沌激光分布式光纤测温技术*

张倩¹⁾²⁾ 王亚辉¹⁾²⁾ 张明江^{1)2)†} 张建忠¹⁾²⁾
乔丽君¹⁾²⁾ 王涛¹⁾²⁾ 赵乐¹⁾²⁾

1) (太原理工大学物理与光电工程学院, 光电工程研究所, 太原 030024)

2) (新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

(2019年1月4日收到; 2019年2月18日收到修改稿)

近年来, 随着分布式光纤传感技术在各大基础设施健康监测领域的广泛应用, 人们对能够实现毫米量级精准定位和监测技术的需求日益增长. 本文提出了一种基于宽线宽混沌激光的高分辨率分布式光纤测温技术. 实验通过改变光反馈混沌源的偏振匹配态和反馈强度等外部参数, 产生了-3 dB线宽约为7.5 GHz的宽线宽混沌激光, 并在300 m传感光纤实现了空间分辨率为7.05 mm的分布式温度测量. 同时, 为了抑制光源线宽增加造成的布里渊增益谱恶化, 在泵浦路中引入了时间门控技术, 其中经脉冲调制后的泵浦光峰值功率提高了约9.5 dB, 同时脉冲调制使混沌互相关锁定于脉冲持续时间内, 从而布里渊增益谱的信号背景噪声比由约2.28 dB提升为4.55 dB, 最终实现了空间分辨率为3.12 mm的分布式温度测量.

关键词: 宽线宽混沌激光, 毫米级空间分辨率, 布里渊光相干域分析, 温度测量**PACS:** 42.68.Mj, 42.81.Pa, 42.81.Dp, 42.79.-e**DOI:** 10.7498/aps.68.20190018

1 引言

目前, 基于受激布里渊散射的分布式光纤温度和应变传感技术已被广泛应用于各种大型土木建筑结构的健康监测^[1-3], 然而在实际应用中仍存在一些技术瓶颈, 例如传感系统空间分辨率难以突破毫米量级, 导致无法精准定位和监测. 在众多基于受激布里渊散射的分布式光纤传感技术中, 布里渊光时域分析技术 (Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)^[4-6] 具有测量距离长的优势, 例如基于光脉冲编码的 BOTDA 技术^[7], 其传感距离可高达120 km, 然而空间分辨率因受限于声子寿命难以突破1 m. 为了提高系统的空间分辨率, 研究者们先后提出差分脉冲对技术^[8]、暗脉冲技术^[9]等, 实现了亚米量级空间分辨率的测量, 但增加了

系统的复杂度且测量耗时长.

布里渊光相干域分析技术 (Brillouin optical correlation domain analysis, BOCDA)^[10,11] 具有测量空间分辨率高的优势. 例如, 韩国 Song 等^[12] 在正弦调制光源的基础上引入时域数据处理技术进行多传感点的并行测量, 在1530 m传感光纤上实现了空间分辨率小于3 cm的分布式应变测量; 以色列 Thevenaz 等^[13] 通过使用高速的伪随机码对泵浦光和探测光进行相位调制, 在40 m传感光纤上实现了1 cm空间分辨率的分布式温度测量等. 然而此类通过对光源进行频率或相位调制的技术受被调制激光器特性的限制, 导致其空间分辨率难以突破毫米量级. 理论上, BOCDA系统的空间分辨率取决于光源的相干长度, 即光源的线宽越宽, 系统的空间分辨率越高. 所以, 研究者们提出了基于低相干态光源的 BOCDA 传感技术, 例如

* 国家自然科学基金 (批准号: 61527819, 61875146) 和山西省回国留学人员科研资助 (批准号: 2016-036, 2017-052) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

以色列 AviZadok 课题组^[14]提出将自发辐射放大 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 噪声作为 BOCDA 系统的光源, 使得传感系统免受电光调制器、微波信号源、信号发生器带宽的影响, 实现了空间分辨率为 4 mm 的分布式温度测量, 但是由于 ASE 光源的光谱密度和输出功率较低, 导致系统信噪比较差, 传感距离不超过 2 m. 我们课题组也提出将低相干态、类噪声的混沌激光应用于传感系统^[15], 并在 BOCDA 系统中实现了传感距离为 906 m、空间分辨率为 4 cm 的分布式温度测量^[16], 后通过时延特征抑制^[17]并引入时间门控技术, 最终在 10.2 km 的传感光纤上实现了 9 cm 空间分辨的分布式温度测量^[18], 为解决传感距离与空间分辨的矛盾提供了方案. 但由于受限于光源的线宽较窄, 其空间分辨率仍没能突破毫米量级.

为了实现毫米级高分辨率的测量, 本文提出了一种基于宽线宽混沌激光的布里渊光相干域分析的分布式温度传感技术, 实验通过改变光反馈混沌的外部参数, 在最佳偏振匹配状态且反馈强度为 0.12 时获得了 -3 dB 线宽为 7.5 GHz 宽线宽混沌光源, 其理论空间分辨率为 3 mm, 并在 300 m 的传感光纤上实现了 7.05 mm 空间分辨率的分布式温度测量, 即混沌布里渊光相干域系统突破了毫米量级高分辨率的测量, 但与系统空间分辨率的理论值之间存在差异. 进一步, 我们通过引入时间门控技术使系统测量增益谱的信号背景噪声比 (signal-to-background ratio, SBR)^[19]由约 2.28 dB 提升为 4.55 dB, 最终实现了 3.12 mm 空间分辨率的分布式温度测量, 与系统的理论空间分辨率一致.

2 实验原理

本文采用光反馈法产生宽线宽的混沌激光, 其动态特性满足 Lang-Kobayashi 速率方程^[20,21], 理论表达为:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left[G(t) - \frac{1}{\tau_p} \right] E(t) + k_f E(t - \tau_f) \exp(-i\omega t), \quad (2a)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{1}{\tau_n} N(t) - G(t) |E(t)|^2, \quad (2b)$$

$$G(t) = \frac{G[N(t) - N]}{1 + \varepsilon |E(t)|^2}. \quad (2c)$$

其中, (2a) 式中最后一项 $k_f E(t - \tau_f) \exp(-i\omega t)$ 为反馈光; E 和 N 分别是半导体激光腔中的复合电场振幅和载流子密度; α , G 分别是线宽增强因子、微分增益系数; τ_p 是光子寿命, ω 是半导体激光器的输出角频率; (2b) 式中 q , V , τ_n 分别是电荷量、有源区体积和载流子寿命, I 是半导体激光器的泵浦电流密度. 实验中可通过改变反馈光的偏振匹配态及反馈光强度得到不同混沌状态, 在偏振匹配态不变时, 改变反馈光强度得到一系列不同状态的混沌激光, 同时发现其自相关曲线中时延特征信号的大小会随反馈强度的改变而改变. 由于时延特征信号在非峰值引起的受激布里渊放大会引起额外的噪声, 在很大程度上限制了混沌 BOCDA 系统的性能, 所以取时延特征信号最小时的反馈强度为最佳反馈强度^[17]. 如图 1 即为最佳反馈强度 0.12 时两种典型偏振匹配态下的混沌激光特性, 可以看出从偏振匹配态 a 到 b, 光谱 -3 dB 线宽由约 3.12 GHz 变为 7.59 GHz, 频谱变得更加平坦且 -3 dB 带宽由 3.88 GHz 变为 8.53 GHz, 自相关曲线内中心相关峰的半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 从 0.114 ns 减小到 0.029 ns, 即该系统的理论空间分辨率由约 1 cm 提高到约 3 mm, 意味着我们通过改变反馈光偏振匹配态和反馈强度, 使混沌 BOCDA 系统的理论空间分辨率实现了从厘米量级到毫米量级的重要突破.

3 实验装置

基于宽线宽混沌激光毫米级分辨率分布式光纤测温技术的实验装置如图 2 所示, 其中红色虚线框内为宽线宽混沌激光源, 是由无内置隔离器的分布式反馈半导体激光器 (distributed feedback laser diode, DFB-LD, WTD, E21239)、光环形器 (optical circulator, OC1)、光纤偏振控制器 (polarization controller, PC1)、可调光衰减器 (variable optical attenuator, VOA) 和 50:50 光纤耦合器四个分立光学器件构成的单反馈外腔. 其中, DFB-LD 的输出通过 OC1 进入反馈环, 通过调节 DFB-LD 的偏置电流以及反馈光路中的光纤 PC1, VOA, 改变反馈光的偏振匹配状态和反馈强度, 使得 DFB-LD 进入混沌状态并产生宽线宽混沌激光, 随后宽线宽的混沌激光经光隔离器 (isolator, ISO1) 进入 90:10 的光纤耦合器后分成

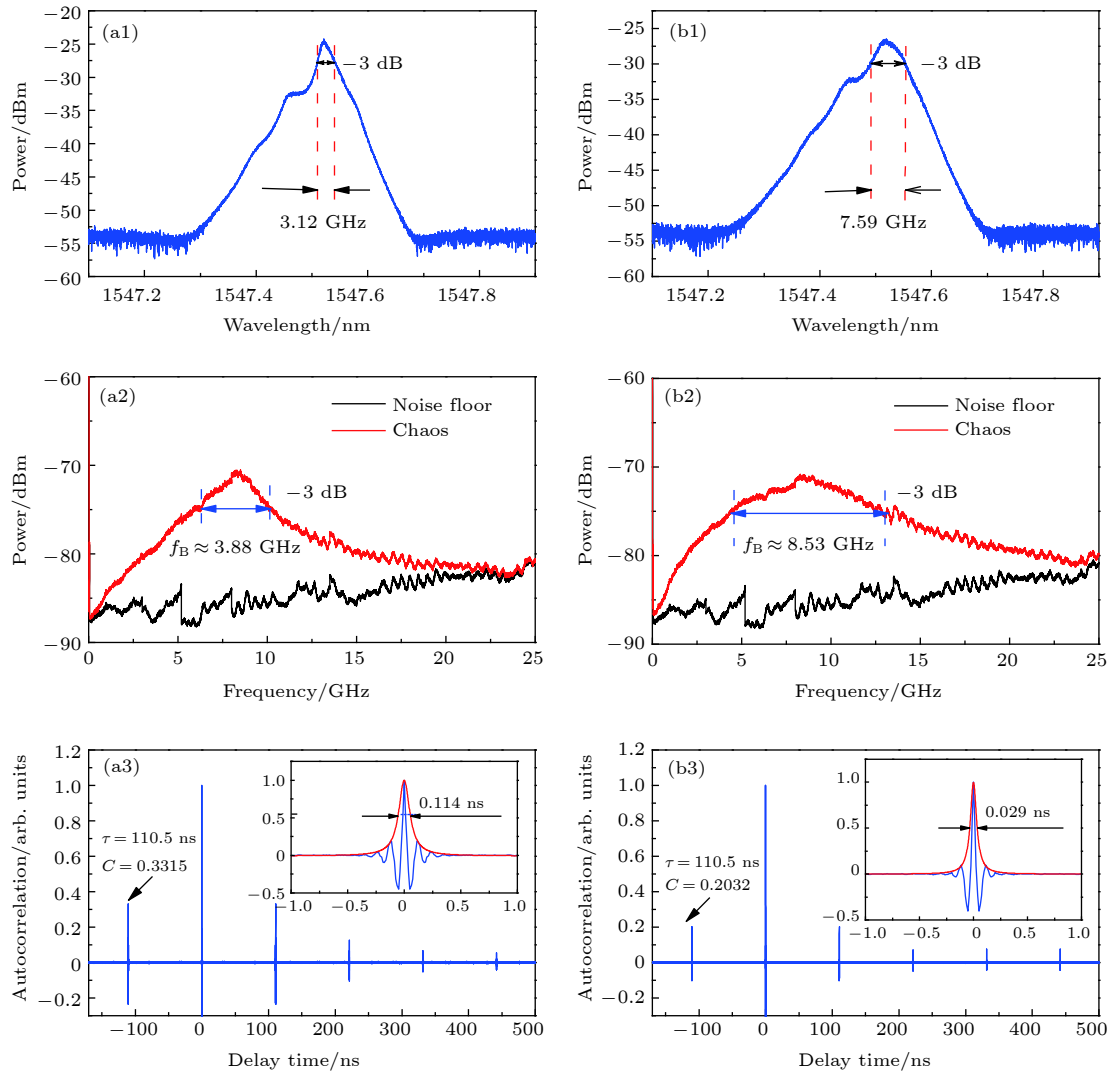


图 1 两种典型偏振匹配态下混沌激光的特性 (a1), (b1) 光谱; (a2), (b2) 频谱; (a3), (b3) 自相关曲线

Fig. 1. The characteristics of the chaotic light at two typical polarization matching states: (a1), (b1) Optical spectra; (a2), (b2) power spectra; (a3), (b3) autocorrelation curve.

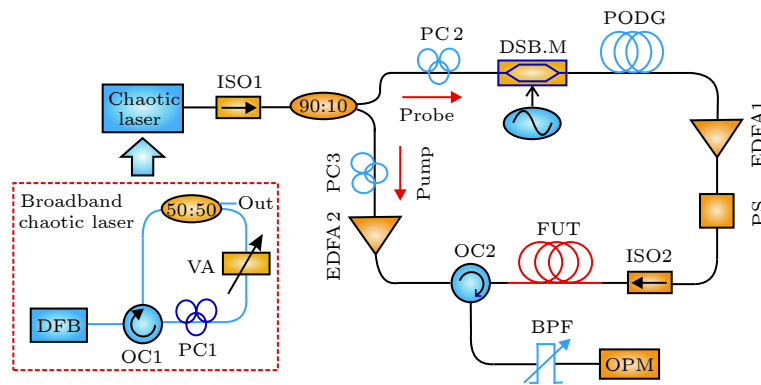


图 2 基于宽线宽混沌激光 BOCDA 系统的实验装置图

Fig. 2. The experimental setup of broadband chaotic BOCDA.

两路, 其中 90% 的一路为探测光路, 经过光纤 PC2 进入由微波信号源 (KEYSIGHT N5173B, scan range 9 kHz—13 GHz) 驱动的电光调制器

(electro-optical modulator, EOM, EOSPACE, 12.5 Gb/s) 进行双边带调制以及载波抑制, 其中正弦信号的调制频率约等于布里渊频移 ν_B . 经调制

后的宽线宽混沌激光依次经过可编程光延迟发生器 (programmable optical delay generator, PODG, General Photonics ODG-101, MDL-002)、掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA1, Connet VLSS-980-B)、扰偏器 (polarization scrambler, PS, General Photonics PCD-104) 及光隔离器 (ISO2) 注入到待测光纤 (fiber under test, FUT) 的一端. 其中, PODG 用于相关峰的定位, EDFA1 将探测光功率放大为 11 dBm, PS 用于消除布里渊增益信号对偏振态的依赖性. 10% 一路为泵浦光路, 先后经过光纤 PC3, 掺铒光纤放大器 (EDFA2, Keopsys CEFA-C-PB-HP) 以及 OC2 注入到 FUT 的另一端, 其中 EDFA2 将泵浦光功率放大为 33 dBm. 两路光在待测光纤中发生受激布里渊放大后, 经 OC2 输出端进入可调带通滤波器 (band pass filter, BPF, Yenista XTM-50, 带宽 4—80 GHz), 滤出的斯托克斯光功率由带有积分球光电二极管功率探头 (Thorlabs S145C, power range 1 μ W—3 W, resolution 1 nW) 的数字光功率计 (optical power meter, OPM, Thorlabs PM100D) 进行采集. 其中, FUT 为单模光纤 (SMF, G.655), 总长约为 300 m (末端 20 cm 放置在恒温箱内), 实验可通过调节可编程 PODG 将待测点定位于光纤不同位置处, 从而进行 FUT 沿线温度信息的采集.

4 实验结果与分析

4.1 基于宽线宽混沌激光的 BOCDA 技术

实验选择 DFB-LD 在最佳反馈强度 0.12 且偏振匹配态 b 时的输出作为 BOCDA 系统光源, 此时混沌激光的 -3 dB 线宽约为 7.5 GHz, 系统的理论空间分辨率约为 3 mm. 设置探测光的扫频范围为 10.55—10.75 GHz, 扫频步进为 1 MHz, 获得待测光纤末端布里渊增益谱 (Brillouin gain spectrum, BGS) 随温度变化的结果如图 3 所示. 显然, 与室温下 (23 $^{\circ}$ C) 测量得到的布里渊增益曲线 (蓝色) 相比, 加热到 55 $^{\circ}$ C 时的布里渊增益曲线 (红色) 产生了约 32 MHz 的频移, 和布里渊频移 (Brillouin frequency shift, BFS) 对温度的灵敏度 (1 MHz/ $^{\circ}$ C) 相吻合, 且此时测量增益谱的信号背景噪声比约为 2.28 dB.

进一步测量得到待测光纤沿线布里渊频移的

分布如图 4 所示. 其中, 图 4(a) 为 300 m 待测光纤沿线布里渊频移的整体分布图, 可以看到在室温区 (23 $^{\circ}$ C) 布里渊频移稳定在约 10.653 GHz, 光纤末端加热区 (269 m 处, 55 $^{\circ}$ C) 见图中红色曲线标示, 布里渊频移发生明显变化; 图 4(b) 为加热位置附近的局部放大图, 其中加热区 (20 cm) 内平均布里渊频移约为 10.685 GHz, 布里渊频移变化量约为 32 MHz, 与前述实验结果一致, 而且布里渊频

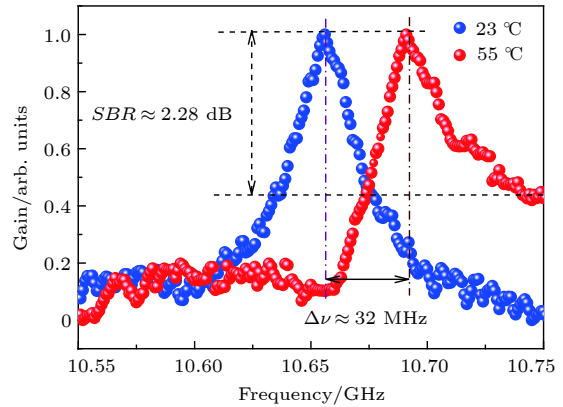


图 3 不同温度下待测光纤末端的布里渊增益谱
Fig. 3. The BGS at different temperature end of FUT.

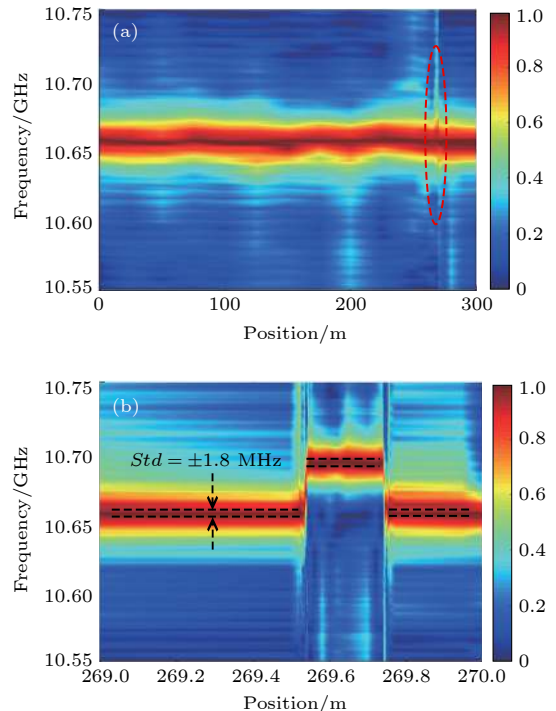


图 4 待测光纤沿线布里渊频移分布图 (a) 整条光纤沿线的布里渊频移分布; (b) 加热位置附近的局部放大图
Fig. 4. The map of BFS distribution along the FUT: (a) Measured along the entire FUT; (b) the local enlargement near heated zone.

移的标准差 (standard deviation, Std)^[18] 约为 ± 1.8 MHz 即测量温度误差约为 ± 1.8 °C, 说明系统具有较好的测量准确性.

根据上述实验结果解调出待测光纤沿线布里渊频移的分布曲线如图 5 所示. 由于 BOCDA 系统的实验空间分辨率可以用上升沿和下降沿 10%—90% 所对应的光纤长度的平均值来表示^[8], 如图中上升沿和下降沿对应的光纤长度分别为 6.62 mm 和 7.48 mm, 取其平均值为 7.05 mm. 所以基于宽线宽混沌激光 BOCDA 系统的空间分辨率约为 7.05 mm, 突破了毫米量级分辨率的分布式温度测量.

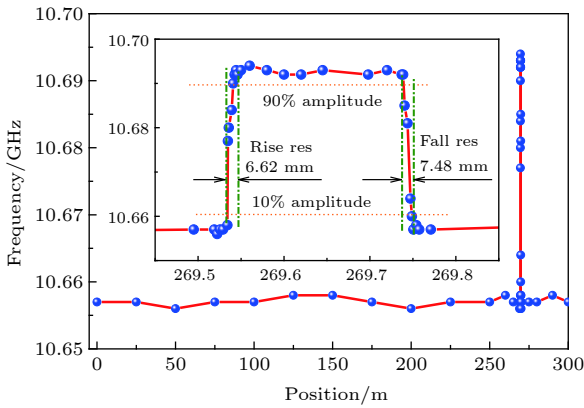


图 5 待测光纤沿线布里渊频移分布曲线

Fig. 5. Measured distribution of the Brillouin frequency shift along the FUT.

4.2 基于时间门控的宽线宽混沌 BOCDA 技术

上述基于宽线宽混沌激光的 BOCDA 系统, 其空间分辨率的理论值为 3 mm, 但实验测量值仅有 7.05 mm 与理论值相比存在较大的误差. 从误差来源分析, 考虑到本文中所使用的光源为宽线宽混沌激光, 与窄线宽的混沌激光相比其在光纤中的受激布里渊散射阈值变大^[22], 这里受激布里渊散射的阈值可表示为^[23]

$$P_{th} \approx 21 \frac{A_{eff} b}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta\nu_{source}}{\Delta\nu_B} \right),$$

式中, P_{th} 为布里渊散射阈值; A_{eff} 为光纤有效面积; 修正因子 b 介于 1 和 2 之间, 取决于泵浦光于斯托克斯光的相对偏振方向; $\Delta\nu_{source}$ 为光源线宽; L_{eff} 为光纤有效作用长度; g_B 为布里渊增益系数. 此时如果入射泵浦光功率较低则会导致测量布里渊增益信号减弱; 同时随着光源线宽的增加, 泵浦光和

探测光在光纤中作用产生的相关峰变窄; 而且混沌信号本身含有时延特征, 其在非峰值引起的受激布里渊散射放大会议引起额外的噪声且在沿光纤传播过程中不断积累, 即光纤越长噪声积累越多. 这些均导致布里渊增益信息在传输过程中极易被噪声淹没, 从而影响系统的测量性能. 因此, 为了提高系统的测量精度, 实现理论空间分辨率值的测量, 一方面通过引入时间门控技术使泵浦光功率提高的同时实现时延特征的有效抑制, 另一方面通过缩短光纤, 将光纤从 300 m 变为 160 m, 以减少噪声沿光纤的积累, 进而提高系统的测量精度.

图 6 所示为时间门控技术^[17] 的实验装置图, 泵浦光经过 EDFA3 和 PC3 进入另一个由脉冲信号驱动的 EOM 进行强度调制, 后经 EDFA2 将功率放大为 33 dBm, 最终经 OC2 入射到 FUT 的一端.

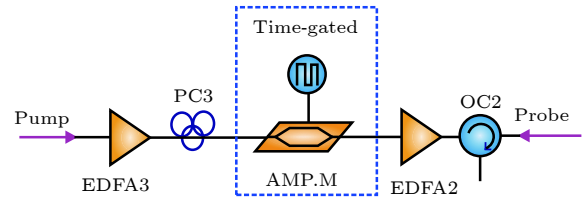


图 6 时间门控技术装置图

Fig. 6. The setup of time-gated.

实验设置调制脉冲的持续时间 $\Delta\tau = 100$ ns, 周期为 $T = 1.5$ μ s, 幅值电压为 2.8 V, 此时被调制 EOM 的消光比达到最大约为 20 dB^[18]. 脉冲调制前后泵浦光的时序变化如图 7 所示, 其中蓝色曲线为脉冲调制前泵浦光的时序, 红色曲线为脉冲调制后的泵浦光时序, 可以看到脉冲调制后泵浦光的

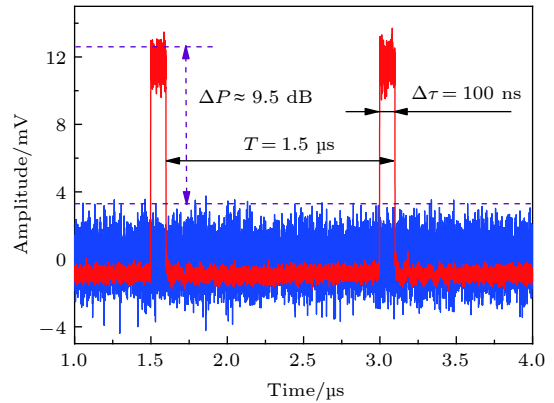


图 7 脉冲调制前后泵浦光时序图

Fig. 7. The time series of the chaotic pump waves (red) and pulse amplitude-modulated (blue).

峰值功率提高了约 9.5 dB, 理论上有效提高了测量增益谱的信号背景噪声比.

图 8 所示为引入时间门控技术前后待测光纤中发生受激布里渊散射的示意图. 图 8(a) 为前述系统待测光纤中发生受激布里渊散射示意图, 可以看到两路光在待测光纤中间位置产生稳定的相关峰 (即受激布里渊散射的声波场), 但由于混沌信号在外腔时延处发生弱幅自相关导致在主峰附近存在残余次峰^[17], 并在受激布里渊散射放大时会引起额外的噪声并沿着光纤不断积累, 最终导致增益信号被噪声淹没而影响测量精度. 图 8(b) 为引入脉冲调制后两路光在待测光纤中发生受激布里渊散射示意图, 由于脉冲调制使两路光的相互作用被限制于脉冲持续时间内, 非中心峰放大和非零基底噪声被有效抑制.

此时待测光纤中布里渊增益谱随温度变化的测量结果如图 9 所示. 因为在泵浦路中引入时间门控技术后, 测量的布里渊增益谱是泵浦光光谱和与待测光纤中布里渊谱的卷积, 经脉冲调制的泵浦光光谱在一定程度上被展宽, 导致布里渊增益谱被展宽, 最终布里渊频移量出现了 1 MHz 的测量偏差^[18],

如图 9(a) 所示, 此时的布里渊频移量约为 33 MHz. 但该偏差对温度的测量结果没有影响, 图 9(b) 所示为加入时间门控技术前后待测光纤中混沌布里渊频移随温度的变化关系, 可以看出加入时间门控技术后, 系统的温度系数由原来的 1.03 MHz/°C 变为 1.09 MHz/°C, 所以 33 MHz 的频移量与 32 °C 的实际温差相匹配. 同时相比于前述系统此时测量增益谱的信号背景噪声比由约 2.28 dB 提升为 4.55 dB.

进一步得到此时系统中待测光纤沿线布里渊频移的分布如图 10 所示. 图 10(a) 为布里渊频移沿 130 m 待测光纤的整体分布情况, 可以看到, 在室温区 (23 °C) 布里渊频移稳定在约 10.653 GHz, 在加热区 (125 m 处, 55 °C) 布里渊频移发生明显变化. 图 10(b) 为加热位置附近的局部放大图, 在加热区 (约 3 m) 内布里渊频移约为 10.686 GHz, 且此时布里渊频移的标准差约为 ± 1.7 MHz.

同样根据上述实验结果解调出待测光纤沿线布里渊频移的分布曲线如图 11 所示. 图中上升沿和下降沿对应的光纤长度分别为 3.06 mm 和 3.15 mm, 取其平均值得到此时系统的空间分辨率为 3.12 mm.

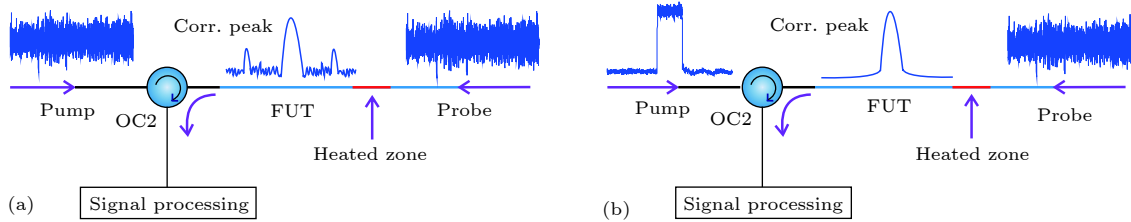


图 8 引入时间门控技术前 (a) 后 (b) 两路光在待测光纤中发生受激布里渊散射示意图
Fig. 8. The schematic diagram of SBS in the previous system (a) and the time-gated system (b).

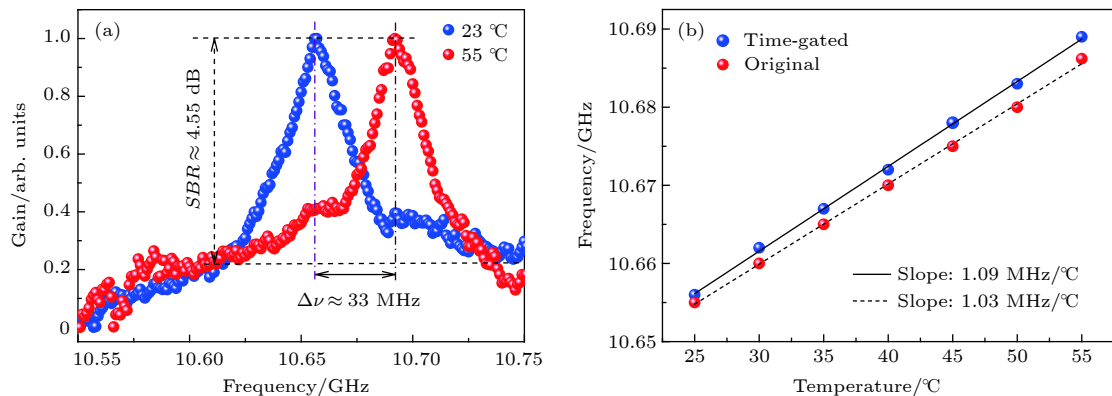


图 9 混沌布里渊增益谱和温度的关系 (a) 待测光纤中随温度变化的布里渊增益谱; (b) 加入时间门控技术前后待测光纤中随温度变化的布里渊频移量

Fig. 9. The relationship of the Chaotic BGS with temperature: (a) Temperature-dependence of the BGS in the FUT; (b) that of the BFS in the chaotic BOCDA systems with (blue) and without (red) the time-gated scheme.

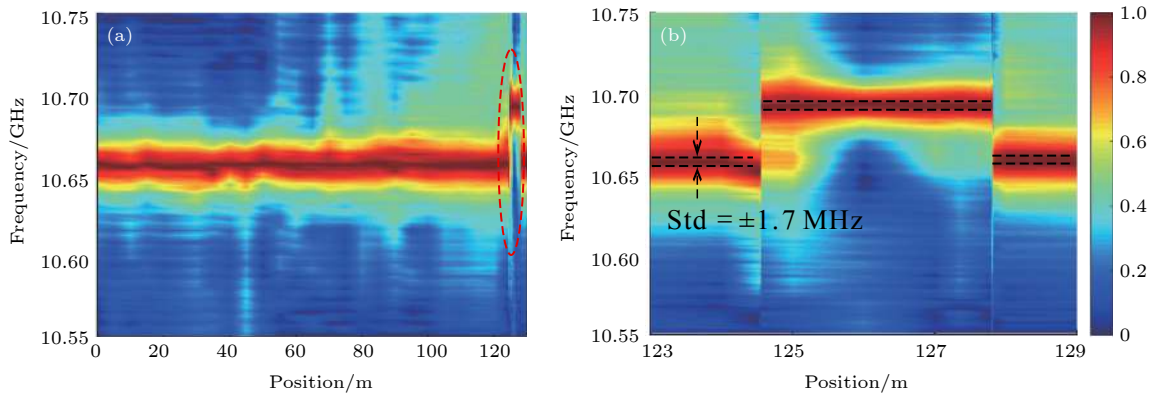


图 10 待测光纤沿线布里渊频移分布图 (a) 整条光纤沿线的布里渊频移分布; (b) 加热位置附近的局部放大图

Fig. 10. The map of BFS distribution along the FUT: (a) Measured along the entire FUT; (b) the local enlargement near heated zone.

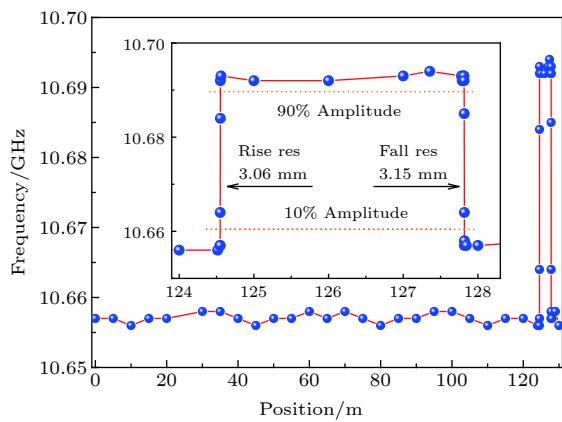


图 11 优化后系统中待测光纤沿线布里渊频移分布曲线
Fig. 11. Measured distribution of the Brillouin frequency shift along the FUT in the setup after optimization.

如前所述, 本文所提出的基于宽线宽混沌激光 BOCDA 系统的理论空间分辨率约为 3 mm, 可见在系统中引入时间门控技术后有效提高了系统的测量精度, 使系统的实验空间分辨率达到了其理论值.

5 结 论

本文提出了一种基于宽线宽混沌激光布里渊光相干域分析的分布式温度传感系统. 实验通过改变光反馈混沌源的反馈光强度及偏振匹配态获得了-3 dB 线宽为 7.5 GHz 的宽线宽混沌光源并将其应用于 BOCDA 系统中, 在 300 m 传感光纤上实现了 7.05 mm 空间分辨率的测量. 后通过引入时间门控技术提出了一种优化方案, 有效地提高了系统的测量精度, 最终实验实现了 3.12 mm 高分辨率的分布式温度测量. 与前面提到的基于

ASE 噪声的布里渊光相干域系统相比, 本文中的宽线宽混沌光源与 ASE 噪声源类似, 均具有低相干、类随机的特性, 可使系统免受被调制激光器特性的限制, 从而易实现毫米级高分辨率的测量, 但宽带混沌光源不受光谱密度和输出功率低的限制, 所以传感距离不局限于 2 m. 然而在该系统中采用数字光功率计进行信号的采集与解调, 会引入较高的测量增益谱背景噪声导致传感距离仅有数百米. 所以在接下来的工作中, 一方面通过对采集系统的改进和优化, 旨在数公里传感光纤上实现毫米级高分辨率的分布式温度或应变的测量. 另一方面通过连续光注入混沌激光器或者利用混沌激光器产生的混沌信号注入另一个自由运行激光器, 产生带宽进一步加强的混沌信号, 旨在在进一步提高分布式温度测量的精度. 综上, 该研究结果为一些基础设施结构的高精度监测提供了一种新思路.

参考文献

- [1] António B, Joan C, Sergi V 2016 *Sensors* **16** 748
- [2] Bao X Y, Chen L 2011 *Sensors* **11** 4152
- [3] Thévenaz L 2010 *Front. Optoelectron. China* **3** 13
- [4] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M 1990 *Opt. Lett.* **15** 1038
- [5] Hu J H, Zhang X P, Yao Y G, Zhao X D 2013 *Opt. Express* **21** 145
- [6] Kim Y H, Song K Y 2017 *Opt. Express* **25** 14098
- [7] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D 2011 *Opt. Lett.* **36** 232
- [8] Li W H, Bao X Y, Li Y, Chen L 2008 *Opt. Express* **16** 21616
- [9] Brown A W 2007 *J. Lightw. Technol.* **25** 381
- [10] Hotate K, Arai H, Song K Y 2008 *Sice J. Control Measur. Syst. Integrat.* **1** 271
- [11] Hotate K, Hasegawa T 2000 *IEICE Trans. Electron.* **83** 405
- [12] Ryu G, Kim G T, Song K Y, Lee S B, Lee K 2017 *J. Lightw. Technol.* **35** 5311
- [13] Zadok A, Antman Y, Primerov N, Denisov A, Sancho J, Thévenaz L 2012 *Laser Photon. Rev.* **6** L1

- [14] Cohen R, London Y, Antman Y, Zadok A 2014 *Opt. Express* **22** 12070
- [15] Ji Y N, Zhang M J, Wang Y C, Wang P, Wang A B, Wu Y, Xu H, Zhang Y N 2014 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **24** 1450032
- [16] Zhang J Z, Zhang M T, Zhang M J, Liu Y, Feng C K, Wang Y H, Wang Y C 2018 *Opt. Lett.* **43** 1722
- [17] Zhang J Z, Feng C K, Zhang M J, Liu Y, Wu C Y, Wang Y H 2018 *Opt. Express* **26** 6962
- [18] Zhang J Z, Wang Y H, Zhang M J, Zhang Q, Li M W, Wu C Y, Qiao L J, Wang Y C 2018 *Opt. Express* **26** 17597
- [19] Jeong J H, Lee K, Song K Y, Jeong J M, Lee S B 2012 *Opt. Express* **20** 27094
- [20] Wang A B 2014 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Taiyuan University of Technology) (in Chinese) [王安帮 2014 博士学位论文 (太原: 太原理工大学)]
- [21] Zhang J Z, Wang A B, Wang J F, Wang Y C 2009 *Opt. Express* **17** 6357
- [22] Zhang M J, Liu H, Zhang J Z, Liu Y, Liu R X 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1943
- [23] Parker T, Farhadiroushan M, Handerek V A 1997 *Proceedings of IEE Colloquium on Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring* London, UK, February 17, 1997 p1

Distributed temperature measurement with millimeter-level high spatial resolution based on chaotic laser*

Zhang Qian¹⁾²⁾ Wang Ya-Hui¹⁾²⁾ Zhang Ming-Jiang^{1)2)†} Zhang Jian-Zhong¹⁾²⁾
Qiao Li-Jun¹⁾²⁾ Wang Tao¹⁾²⁾ Zhao Le¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan 030024, China*)

2) (*Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

(Received 4 January 2019; revised manuscript received 18 February 2019)

Abstract

The high-precision structural health monitoring of large civil structures and materials are increasingly demanded with widely using the distributed fiber sensors. A Brillouin optical correlation domain analysis for millimeter-level high spatial resolution sensing using broadband chaotic laser is proposed and demonstrated. Through the analysis of the influence of polarization state and feedback strength on the chaotic laser, we experimentally achieve a broadband chaotic laser with a spectrum over 7.5 GHz in -3 dB which means that the theoretical spatial resolution is 3 mm, and we also successfully measure the distribution of fiber Brillouin gain spectrum with a temperature over 300 m measurement range with 7.05 mm spatial resolution, which is the first time that the sensor system based on chaotic laser has achieved the measurement with millimeter-level. However, there is still a difference in spatial resolution between the experimental and theoretical values. We can find that the chaotic laser has a time-delay feature; besides, with the broadening of chaotic laser, the threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers increases while the Brillouin gain will weaken if the pump power is not enough here, and the cross-correlation peak of chaotic laser will narrow. All these problems cause the Brillouin gain signal to be easily submerged by noise, so the performance of the chaotic Brillouin optical correlation domain analysis system will decrease ultimately. Therefore, we also propose an optimization of Brillouin optical correlation domain analysis system by introducing the time-gated scheme into pump branch. It is obvious that the peak power of the pump wave is heightened by more than 9.5 dB after being amplitude-modulated by a square pulse with a pulse width of greater than acoustic phonon lifetime, and the signal-to-back ground noise ratio of the gain spectrum is improved effectively in theory; the cross correlation between chaotic pump wave and probe wave is locked within a pulse duration time, and the residual stimulated Brillouin scattering interactions existing outside the central correlation peak can be largely inhibited. In this optimized setup, the performance of the distributed temperature sensing is improved to 3.12 mm spatial resolution, which corresponds well to the theoretical value. The improved chaotic Brillouin optical correlation domain analysis technology will have a great potential application in high-precision structural health monitoring of large civil structures.

Keywords: broadband chaotic laser, millimeter-level spatial resolution, Brillouin optical correlation domain analysis, temperature measurement

PACS: 42.68.Mj, 42.81.Pa, 42.81.Dp, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.68.20190018

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61527819, 61875146) and the Shanxi Scholarship Council of China (Grant Nos. 2016-036, 2017-052).

† Corresponding author. E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn