

# 基于布里渊增益和损耗级联的高性能布里渊相干域分布式光纤传感系统

金重九 邹卫文 李 颢 陈建平

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 基于布里渊相干域分析(BOCDA)原理,采用布里渊增益和损耗级联的方案优化 BOCDA 系统,在理论分析和实验验证基础上进行样机研制和功能验证。受激布里渊散射过程中的布里渊增益和损耗效应具有相同的布里渊增益谱特性,它们的级联不仅能提高布里渊净增益、系统信噪比和高精度,同时还可降低系统复杂度和系统成本。使用双平行调制器、两级光放大器、扰偏器、模电优化设计和数据采集处理等单元,研制了一套原理样机。实现了测量空间分辨率达 1.6 cm、测量精度达  $10 \mu\epsilon$ (或  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )的分布式光纤传感样机。

**关键词** 光纤光学;分布式光纤传感;受激布里渊散射;布里渊损耗效应;布里渊相干域分析

**中图分类号** TN247; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050602

## Distributed Fiber-Optic Sensing System of Brillouin Gain and Loss Effects Based on Brillouin Optical Correlation Domain Analysis

Jin Chongjiu Zou Weiwen Li Hao Chen Jianping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** This paper proposes and demonstrates a novel scheme to improve the traditional Brillouin optical correlation domain analysis(BOCDA) system by combining Brillouin gain and loss effects. Thanks to the net gain measurement between the Brillouin gain and loss, the signal-to-noise ratio of the novel scheme is two-fold enhanced, but a also the scheme system needs fewer devices. We develop a prototype of the modified BOCDA system for distributed strain/temperature sensing by utilizing DMZM, two-level EDFA, polarization scrambler optimized circuit design and data acquisition technique, which has high spatial resolution of 1.6 cm, and high accuracy of  $10 \mu\epsilon$  (or  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Key words** fiber optics; distributed fiber sensor; stimulated Brillouin scattering; Brillouin loss effect; Brillouin optical correlation domain analysis

**OCIS codes** 060.2370; 290.5900; 120.5820

## 1 引言

结构健康监测技术可应用于检测基础设施早期创伤和预防灾害。作为一种理想的结构健康检测技术,分布式光纤传感技术利用普通光纤作为感知元件与传输介质,可以在整个光纤长度上对分布式环境参数进行连续测量,同时获得被测量结构参数的空间和时间变化信息,显示出非常广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。基于布里渊散射的分布式光纤传感技术,利用应变和温度与布里渊频移相关的特性,可以实现应变和温度的分布式检测。布里渊分布式光纤传感技术具有同时测量两个参量<sup>[2,3]</sup>、空间分辨率高、传感距离长<sup>[4]</sup>和测量精度高等优点,近 20 年来受到国内外研究者的关注。

**收稿日期**: 2012-12-27; **收到修改稿日期**: 2013-02-04; **网络出版日期**: 2013-04-12

**基金项目**: 国家 973 计划(2011CB301705)、国家自然科学基金(61007052, 61127016)、科技部国际合作项目(2011DFA11780)、教育部回国基金(12Z102050003)、上海市浦江人才计划(12PJ1405600)、上海市学术带头人项目(12XD1406400)和上海交通大学 SMC-晨星学者计划(12X100010002)资助课题。

**作者简介**: 金重九(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: jinchongjiu@sjtu.edu.cn

**导师简介**: 邹卫文(1980—),男,博士,副教授,主要从事光信号感知和处理等方面的研究。E-mail: wzou@sjtu.edu.cn (通信联系人)

自 1989 年 Horiguchi 等<sup>[5]</sup>首次提出布里渊散射分布式光纤传感以来,目前主要技术分为布里渊光学时域传感技术(BOTDA/BOTDR)和布里渊光学相干域技术(BOCDA/BOCDR)。布里渊光学时域传感技术具有监控范围大(几千米到数十千米)的优点,但空间分辨率低(几米到数十米)、测量时间长(几分钟到数十分钟)是其最大的不足。这些缺点主要是受光纤布里渊散射中声子寿命短(10 ns)和增益频谱窄(约 100 MHz)的限制。这是因为 BOTDA/BOTDR 的空间分辨率和光脉冲宽度成正比<sup>[5]</sup>,而光脉冲宽度和光频谱宽度成反比,如果脉冲宽度小于 10 ns,声子尚未完全形成,同时增大的光频谱宽度也会进一步展宽增益频谱宽度<sup>[6]</sup>。由日本东京大学 Hotate 等<sup>[7]</sup>于 2000 年提出的布里渊光学相干域技术是一种基于相干的连续光整合技术,因此不受声子寿命的理论极限限制。该技术空间分辨率只决定于相干技术中的调频参数,可达厘米量级<sup>[8]</sup>。

近年来,BOTDA 技术的研究取得了许多新的研究成果。加拿大渥太华大学的 X. Bao 团队提出基于低消光比调制技术的 10 cm 分辨率的 BOTDA 技术<sup>[9]</sup>和基于差分方法的 DPP-BOTDA 技术<sup>[10]</sup>,能实现 10 cm 甚至更好的空间分辨率。2010 年韩国中央大学 Song 等<sup>[11]</sup>报道了基于布里渊动态光栅的新型 BOTDA 技术,该技术可实现厘米量级的空间分辨率。这些改进技术可以显著提高 BOTDA 的空间分辨率,但代价是大幅度提高系统复杂度,并且测量速度慢、后端数据处理复杂。国内研究者在布里渊光学时域传感技术方面也开展了系列研究,浙江大学宋牟平等<sup>[12]</sup>实现了测量 50 km,在 10 m 空间分辨率下达到 2 °C 测量精度的 BOTDA 系统。南京大学 Lu 等<sup>[13]</sup>提出了利用宽带检测结合离散傅里叶变换来提高 BOTDR 系统传感速度的方法。

BOCDA 的研究也取得了长足的进展。通过两级锁相放大检测技术,可实现毫米量级的空间分辨率<sup>[8]</sup>;利用相干快速扫频技术实现了传感光纤全程的超高速测量<sup>[14]</sup>。基于近期提出的布里渊动态光栅概念实现了温度和应变的完全分离技术<sup>[2]</sup>,采用 BOCDA 的高空间分辨率特点实现了在中、长距离上的 10 cm 分辨率的温度与应变同时分布式传感<sup>[15~17]</sup>,有望在智能结构和材料的健康监测(如飞机机翼、桥梁关键部位等)上应用推广。

本文首先介绍一种 BOCDA 系统的优化方案<sup>[18]</sup>,然后基于受激布里渊散射(SBS)过程中的增益和损耗现象,通过单一器件实现增益和损耗的同时测量,提高系统信噪比和精度。在此基础上提出系统集成方案,研制了一套原理样机,实现了空间分辨率达 1.6 cm,测量精度达 10  $\mu\epsilon$ (或 0.5 °C)的分布式光纤传感实用系统。

## 2 优化方案原理

不同于 BOTDA 的光时域传感技术,BOCDA 使用连续激光源,并在其中加入周期性的光频率调制,使得抽运光和探测光在特定的区域中产生相关,只在相关峰处产生布里渊效应。改变激光器的频率调制的周期,就可以改变布里渊散射有效作用的相干峰位置,从而实现分布式的布里渊传感。空间分辨率由激光器光频率调制的周期(或频率)和调制深度决定,目前可以做到厘米甚至毫米量级<sup>[7,8]</sup>。

传统的 BOCDA 方案由于空间分辨率高,布里渊作用的距离短,信号非常微弱,因此需使用锁相放大技术,并且需要使用多个放大器和调制器,系统较为复杂。传统的 BOCDA 方案中,Wave2( $I_2$ )的频率始终比 Wave1( $I_1$ )低一个布里渊频移( $\nu_B$ )。抽运光由一个光强度调制器加载方波周期性地控制开启和关闭。因为实际空间分辨率很高,光纤中发生布里渊效应的长度很短,可以认为布里渊散射作用产生的增益光或衰减光强度远小于原光强度,因此可以不考虑抽运光衰减,则 Wave2 获得的布里渊增益及锁相相关接收可以表示为<sup>[19]</sup>

$$I_{\text{gain}} = I_2 \exp(g_B I_1 \Delta z) + I_1 R \approx I_2 + g_B \Delta z I_1 I_2 + I_1 R, \quad (1)$$

$$V_a = \eta \left( \int_0^{\frac{\pi}{\omega_l}} I_{\text{gain}} dt - \int_{\frac{\pi}{\omega_l}}^{\frac{2\pi}{\omega_l}} I_2 dt \right) = \eta (g_B \Delta z I_1 I_2 + I_1 R) \frac{2\pi}{\omega_l}, \quad (2)$$

式中  $g_B$  是布里渊增益相关系数, $\Delta z$  是 BOCDA 系统空间分辨率, $\omega_l$  是加载的方波的角频率, $h$  是锁相放大器相关系数, $R$  表示传感光纤中的端面反射和瑞利散射的后向反射率, $V_a$  为锁相放大器输出的布里渊增益谱(BGS)信号幅度。

如图 1 所示,在 BOCDA 的优化方案中,Wave2 的频率保持不变,而 Wave1 交替地处于上边频或下边频调制。当 Wave1 处于图 1(a)中上边频调制状态时,Wave1 作为抽运光,而 Wave2 作为探测光,因此 Wave2

处于布里渊增益过程,增益后的光强度可表示为

$$I_{2\text{gain}} = I_2 \exp(g_B I_1 \Delta z) + I_1 R \approx I_2 + g_B \Delta z I_1 I_2 + I_1 R, \quad (3)$$

当 Wave1 处于图 1(b)中下边频调制状态时,与此前刚好相反,Wave1 作为探测光而 Wave2 作为抽运光,因此 Wave2 处于布里渊损耗过程,其光强可以表示为

$$I_{2\text{loss}} = I_2 \exp(-g_B I_1 \Delta z) + I_1 R \approx I_2 - g_B \Delta z I_1 I_2 + I_1 R. \quad (4)$$

Wave2 被光电探测器转化为电信号,并通过锁相相关接收,如图 1(c)所示,可表示为

$$V_b = \eta \left( \int_0^{\frac{\pi}{\omega_l}} I_{2\text{gain}} dt - \int_{\frac{\pi}{\omega_l}}^{\frac{2\pi}{\omega_l}} I_{2\text{loss}} dt \right) = 2\eta g_B \Delta z I_1 I_2 \frac{2\pi}{\omega_l}, \quad (5)$$

式中  $V_b$  为锁相放大器输出的 BGS 信号幅度。

从(2)式和(5)式比较可得,优化的方案在同等情况下信噪比可提升一倍。传统的 BOCDA 方案中仅依靠布里渊增益过程,抽运光被周期性地开启/关闭,布里渊增益被锁相放大器提取<sup>[7]</sup>。如(2)式所示,如果传感光纤端面出现反射(或者光纤中的瑞利散射)时,抽运光的反射信号同样具有开启/关闭的周期,无法被锁相放大器有效消除,给布里渊增益频谱探测引入额外噪声。本文提出的优化方案同时利用布里渊散射增益和损耗两个过程之间的净差来测量散射净增益,Wave2 无论是上边带还是下边带,经过掺铒光纤放大器(EDFA)两级放大后,光功率均相同。即使传感光纤存在端面反射(或瑞利散射),如(3)式和(4)式所示,其反射功率在增益和损耗两个过程中为恒定值,因此在锁相放大器相关过程中被有效滤除,见(5)式。

### 3 系统集成样机设计和实现

优化方案的系统结构如图 2 所示。由精密电流和温度控制器驱动的 1550 nm 分布反馈式激光二极管(DFB-LD)作为光源,输出的光被耦合器分成两路,用于输出 Wave1 和 Wave2。其中一路经过延迟光纤、扰

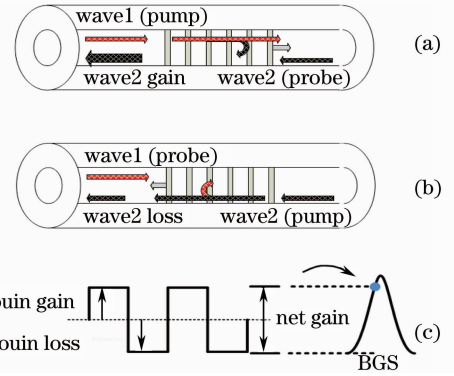


图 1 BOCDA 优化方案原理图。(a) 布里渊增益过程; (b) 布里渊损耗过程; (c) 信号锁相相关接收  
Fig. 1 Principle of optimized BOCDA scheme. (a) Brillouin gain process; (b) Brillouin loss process; (c) phase-locking correlation reception

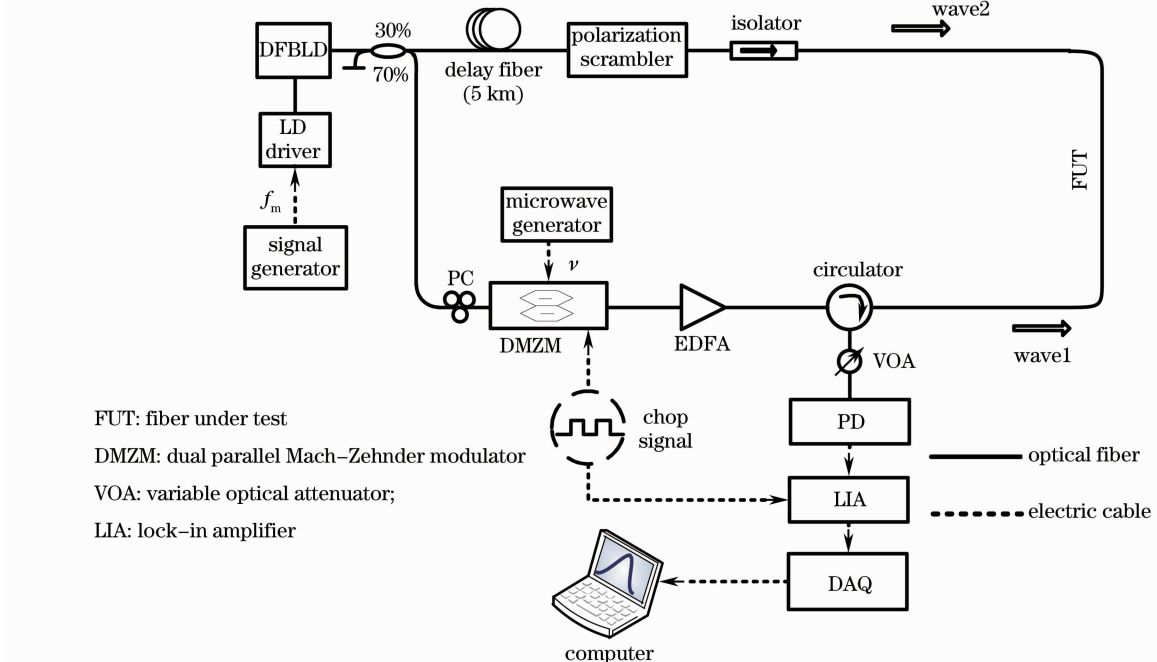


图 2 优化 BOCDA 系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optimized BOCDA system

偏器和光纤隔离器,直接作为 Wave2 被耦合入传感光纤中。在另一路上,经偏振控制器(PC)后,用单边带调制器将微波信号调制后,再经 EDFA 放大,作为 Wave1 通过环形器输入传感光纤。

单边带调制器为双平行结构的调制器。在双平行调制器的第三个偏置控制端加载低电压或高电压时,使其处于 0 偏置或  $\pi$  偏置。因此调制器可以输出载波抑制的上边带或下边带的单边带(SSB)光信号<sup>[20]</sup>。调制器的第三偏置由方波信号控制,可以实现 Wave1 相对于 Wave2 频率交替上移或下移 10~11 GHz。Wave2 与 Wave1 在传感光纤中经过受激布里渊作用后,通过环形器进入光电探测器(PD)转换为电信号,再通过锁相放大器相关放大,去除噪声干扰,并由数据采集卡(DAQ)进行数据采集和处理,送入上位机后分析得出有用的传感数据。

和传统 BOCDA 方案<sup>[7,8]</sup>相比,本方案大幅度减少了系统复杂度,降低了系统成本。这是因为传统 BOCDA 系统需要至少两个电光调制器和两个光放大器;而本方案系统只使用一个单边带调制器对 Wave1 进行频率上移和频率下移的单边带调制,直接将激光源的部分输出用作 Wave2。

光放大器用来放大调制后功率较微弱的 Wave1,可以提高受激布里渊效应的强度。本系统使用两级放大 EDFA:第一级是一个小信号放大 EDFA,将调制后较低功率的 Wave1 放大到合适水平,然后通过宽带光滤波器过滤 EDFA 的自发辐射噪声,再通过第二级大功率放大 EDFA,将第一级放大的 Wave1 进一步放大到系统所需的光功率。采用两级 EDFA 放大能显著放大 Wave1 中被调制的上边频光或下边频光的功率,减少放大中产生的噪声源,因此可以提高抽运光的有效功率,进一步提高了探测灵敏度和精度。

由于布里渊散射对偏振相关敏感,传感光纤中引入的偏振变化会产生噪声,恶化系统探测精度。我们在系统中加入扰偏器,将 Wave2 的偏振态以一个较高的频率(大于 500 kHz)扰动,在后端锁相放大的过程中滤除扰偏器产生的特定频率噪声,这样就可以抵消偏振变化带来的噪声,保证了系统探测精度。

系统控制结构如图 3(a)所示。计算机通过 GPIB 总线控制输入单边带调制器的射频(RF)合成器,用来产生布里渊扫频信号。通过 GPIB 控制任意波形发生器,改变激光器输入电流,使其光频率被周期性调制,进而实现传感光纤上的分布式传感。通过 USB 控制方波信号发生器产生参考信号,输入单边带调制器(SSBM)与锁相放大器中。数据采集卡采用 NI 公司的 DAQ USB-6351 数据采集卡,它具有 16 bit 分辨率,1.25 MS/s 采样速率,使用 USB2.0 接口与上位机通信,用 LabVIEW 编程采集数据。计算机将采集卡采集的数据处理后得出传感光纤上的分布式 BGS 和分布式布里渊频移。图 3(b)为系统集成样机外观示意图。

为了达到高精度的控制和微小信号探测,系统中的供电分为模拟电路模块供电和数字电路模块供电,并

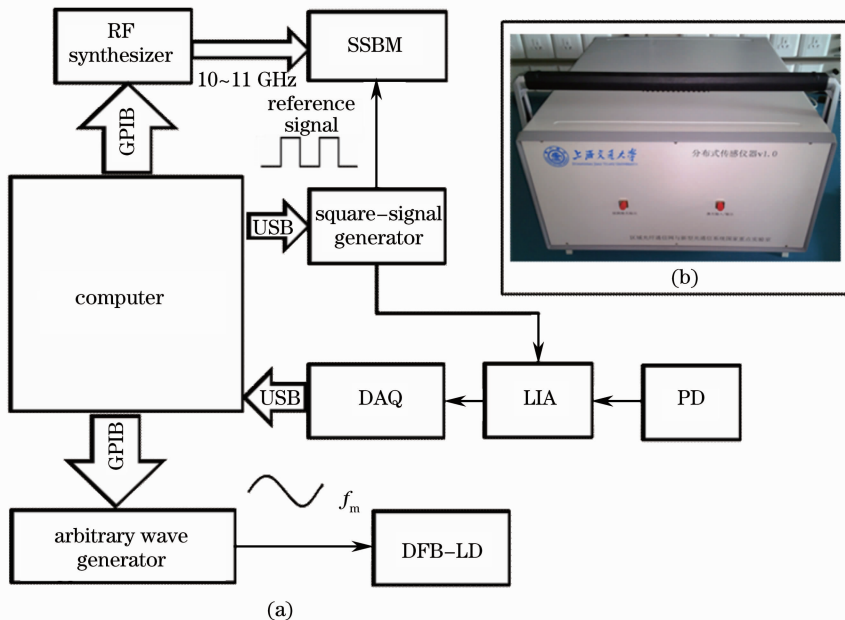


图 3 (a) 系统控制示意图; (b) 样机外观图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of system control configuration; (b) diagram of the prototype

且按照微弱信号模块-小信号模块-大信号模块-数字信号模块的顺序接地,系统中需要供电的模拟电路模块按照信号从弱到强可以排序为:光电探测器模块、锁相放大器模块、单边带调制器模块、微波放大器模块、激光器驱动器模块和 EDFA 光放大器模块。并且要将关键模块和走线用金属材料包裹并接地,保证模块间互相干扰最低。

## 4 性能测试

首先对本系统提出的布里渊增益和损耗级联方案和传统的仅利用布里渊增益的方案进行实验性能验证。以一段 5 m 长的单模光纤作为测试光纤,结果如图 4 所示。图中实线表示本方案的实验结果,虚线表示传统方案测试的布里渊增益谱,点线表示的是布里渊损耗谱的绝对值。从图中可以看出,利用布里渊增益、损耗级联的净增益等于布里渊增益和布里渊损耗的绝对值之和,大约是其各自的两倍,与理论分析[如(5)式所示]基本相符。图 4 中增益的 BGS 和损耗的 BGS 峰值有细微区别,原因是单边带调制器调制时可能存在的边带抑制残余情况(即边带消光比),会改变斯托克斯光和反斯托克斯光的功率比,从而影响布里渊光谱净增益的强弱。实际应用中需要将单边带调制器的参数进一步最优化,达到最大净增益。

我们还进一步实验验证了系统性能对单边带调制器边带消光比的依赖关系。图 5 是边带消光比对布里渊光谱信号的影响曲线,图中曲线是理论计算结果,实心点是实测数据点,可以看出消光比越高,布里渊信号越好,理论与实际一致。

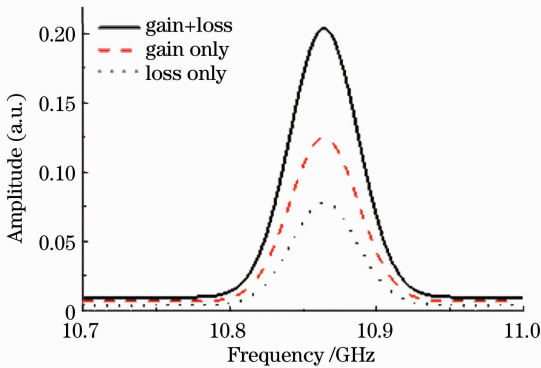


图 4 测量的 BGS 对比图

Fig. 4 Comparison of the measured BGS

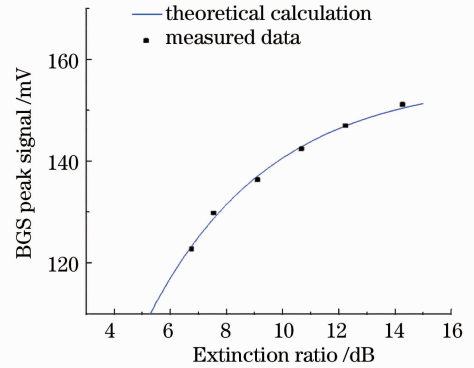


图 5 消光比对 BGS 信号的影响

Fig. 5 BGS peak signal versus extinction ratio

在激光器上加载  $f_m = 20$  MHz 附近的调制信号,用来实现分布式传感。调制后的光源线宽 3 GHz。计算得出测量距离为 5 m,空间分辨率为  $1.6 \text{ cm}^{[18]}$ 。在 5 m 测试光纤上选取了一段 5 cm 长的光纤,并施加了不同应力,使其产生不同的应变。图 6(a)是分别对测试光纤不加载应变及加载  $220 \mu\epsilon$  和  $820 \mu\epsilon$  应变时布里渊频移峰值的分布结果。图 6(b)是探测施加应力的 5 cm 测试光纤的布里渊频谱三维(3D)分布图。可以

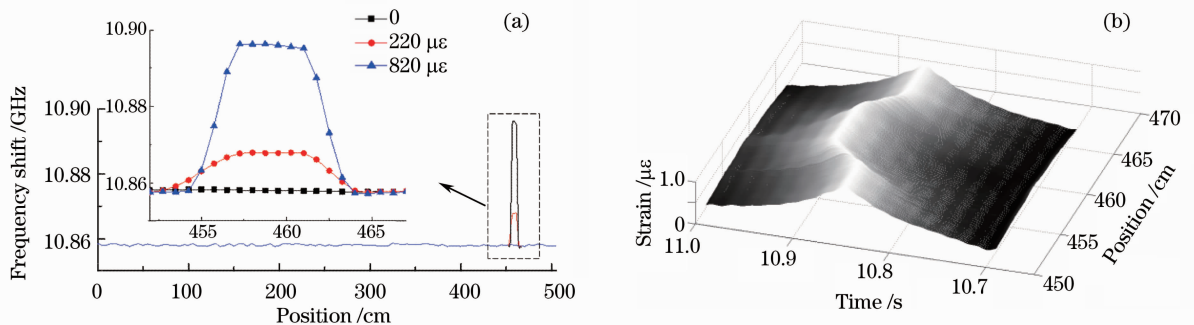


图 6 (a)测试光纤在 5 cm 长的一段处施加不同应变时,布里渊频移峰值图;(b)施加应力的 5 cm 测试光纤的布里渊频谱和位置的三维图

Fig. 6 (a) Measured Brillouin frequency-shift peak distribution in the 5-cm-long fiber applied with different stress under test; (b) 3D plot of the BGS distribution and position of the 5-cm-long fiber applied with stress

看到数据的光滑性很好,光纤中端面反射、瑞利散射等噪声干扰较小,应变突变(约为 1.5 cm)处变化均匀,达到了理论计算的 1.6 cm 分辨率。实验表明,应用本优化方案可实现高空间分辨率(1.6 cm),测量精度达到 0.5 MHz,应变(或对应的温度)分辨率为  $10\ \mu\epsilon$ (或  $0.5\ ^\circ\text{C}$ )。

## 5 结 论

提出和实现了一种新型的布里渊分布式光纤传感系统。系统基于布里渊相干技术进行优化,同时探测光纤中受激布里渊增益和损耗两个效应。相比传统的 BOCDA 分布式传感系统,本方案进一步提高了分布式传感整体性能,在确保高空间分辨率的同时,还将系统信噪比提高了 3 dB。本方案还能减少光纤中端面反射等噪声带来的干扰,降低系统复杂度和成本。演示了自行研制的传感系统原理样机,在 5 m 的测量距离内,空间分辨率达 1.6 cm,应力(温度)精度达  $10\ \mu\epsilon$ ( $0.5\ ^\circ\text{C}$ )。相比于其他布里渊分布式传感系统,本系统的空间分辨率和测量精度较高,且具有系统复杂度较低和成本低的优势,适合应用于精度要求高的材料和结构的健康监测领域。

## 参 考 文 献

- 1 K. Hotate. Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures [C]. *SPIE*, 2004, **5604**: 1~10
- 2 W. Zou, Z. He, K. Hotate. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1248~1255
- 3 W. Zou, Z. He, K. Hotate. Investigation of strain- and temperature-dependences of Brillouin frequency shifts in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1854~1861
- 4 X. Angulo-Vinuesa, M. A. Soto, S. Martin-Lopez *et al.*. Brillouin optical time-domain analysis over a 240 km-long fiber loop with no repeater [C]. *SPIE*, 2012, **8421**: 8421C9
- 5 T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(5): 107~108
- 6 H. Naruse, M. Tateda. Trade-off between the spatial and the frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6516~6521
- 7 K. Hotate, T. Hasegawa. Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique — proposal, experiment and simulation [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2000, **83**(3): 405~412
- 8 K. Y. Song, Z. He, K. Hotate. Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2526~2528
- 9 S. Afshar, G. A. Ferrier, X. Bao *et al.*. Effect of the finite extinction ratio of an electro-optic modulator on the performance of distributed probe-pump Brillouin sensor systems [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(16): 1418~1420
- 10 W. Li, X. Bao, Y. Li *et al.*. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21616~21625
- 11 K. Y. Song, S. Chin, N. Primerov *et al.*. Time-domain distributed fiber sensor with 1 cm spatial resolution based on Brillouin dynamic grating [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(14): 2062~2067
- 12 Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1426~1429  
宋牟平, 励志成, 裘超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1426~1429
- 13 Y. Lu, R. Dou, X. Zhang. Wideband detection of spontaneous Brillouin scattering spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry [C]. *SPIE*, 2008, **7158**: 715818
- 14 W. Zou, Z. He, K. Hotate. Realization of high-speed distributed sensing based on Brillouin optical correlation domain analysis [C]. *CLEO*, 2009. CMNN5
- 15 W. Zou, Z. He, K. Hotate. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(8): 526~528
- 16 W. Zou, Z. He, K. Hotate. One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 2363~2370
- 17 R. K. Yamashita, W. Zou, Z. He *et al.*. Measurement range elongation based on temporal gating in Brillouin optical correlation domain distributed simultaneous sensing of strain and temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012,



**24**(12): 1006~1008

- 18 W. Zou, C. Jin, J. Chen. Distributed strain sensing based on combination of Brillouin gain and loss effects in Brillouin optical correlation domain analysis [J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, **5**(8): 082503
- 19 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 223~240
- G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 223~240
- 20 S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou *et al.*. Single side-band modulation performance of a LiNbO<sub>3</sub> integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 364~366