

# 基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术新进展

彭映成<sup>1,2</sup> 钱海<sup>2\*</sup> 鲁辉<sup>2</sup> 郭弦<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)  
(<sup>2</sup> 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要** 布里渊光时域分析(BOTDA)是目前分布式光纤测量技术的主流。介绍了该技术的最新研究进展及主要技术方法,阐述了该技术的原理、特点及主要技术局限。针对传统 BOTDA 的局限,介绍了预抽运脉冲 BOTDA(PPP-BOTDA)与差分脉冲对 BOTDA(DPP-BOTDA)这两种可提高空间分辨率、测量精度与信噪比(SNR)的新技术,分析了这两种技术的原理、实现方法以及相较于传统 BOTDA 技术的优点。介绍了利用保偏光纤(PMF)和光子晶体光纤(PCF)的特性同时测量温度与应变的新技术。

**关键词** 光纤光学;受激布里渊散射;布里渊光时域分析;保偏光纤

**中图分类号** TP212.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100005

## New Research Progress on Distributed Optical Fiber Sensor Technique Based on BOTDA

Peng Yingcheng<sup>1,2</sup> Qian Hai<sup>2</sup> Lu Hui<sup>2</sup> Guo Xian<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)  
(<sup>2</sup> Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract** Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) is presently the mainstream in distributed optical fiber measuring techniques. Research progress and technical methods are introduced. The characteristics and the main technological limits of BOTDA are stated in this paper. Two novel techniques, pulse-prepump-BOTDA (PPP-BOTDA) and differential pulse-width pair-BOTDA (DPP-BOTDA), with which special resolution, measuring precision and signal-to-noise ratio (SNR) can be improved, are introduced. New techniques that employ the characteristics of polarization-maintaining fiber (PMF) and photonic crystal fiber (PCF) to measure temperature and strain simultaneously are introduced.

**Key words** fiber optics; stimulated Brillouin scattering; Brillouin optical time domain analysis; polarization-maintaining fiber

**OCIS codes** 060.2300; 060.2310; 060.2370; 060.2430

## 1 引言

布里渊光时域分析(BOTDA)技术最初由 Horiguchi 等<sup>[1]</sup>提出。基于 BOTDA 的分布式光纤传感器利用直流探测光和脉冲抽运光之间的受激布里渊散射(SRS),通过受激布里渊效应对探测光的放大,实现接收信号强度大、测量精度高和动态范围宽等特性。基于检测受激布里渊散射信号的 BOTDA 技术具有在传感光纤区域内同时获取随时间和空间变化连续分布信息的能力,在长距离及高精度测量上与其他传感技术相比具有明显优势,使之成为目前传感技术领域研究的热点。本文综述了基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术的研究进展和主要技术方法,具体介绍了预抽运脉冲(PPP)、差分脉冲对(DPP)BOTDA 以及利用保偏光纤(PMF)和光子晶体光纤(PCF)的新技术。

**收稿日期**: 2013-05-16; **收到修改稿日期**: 2013-06-29; **网络出版日期**: 2013-09-02

**作者简介**: 彭映成(1972—),男,博士,高级工程师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: j01307@sohu.com

\* **通信联系人**。E-mail: 120301322@qq.com

## 2 BOTDA 传感原理

光纤介质中始终存在着不同程度的弹性力学振动或声波场。这种宏观弹性力学振动,使介质密度随时间和空间而周期性起伏,从而折射率也呈周期性变化,因此对入射光产生散射作用,并且散射光的频移大小与散射角及介质的声波特性有关,这种散射称为布里渊散射。

当激光注入传感光纤后,抽运波、斯托克斯波、声波之间的相互耦合产生布里渊散射效应。在该散射过程中,斯托克斯波的布里渊频移(BFS)大小、散射强度等随光纤的温度和应变变化。布里渊频移和强度是温度和应变的函数

$$\Delta\nu_B = C_1 \Delta\varepsilon + C_2 \Delta T, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_B}{P_B} = C_3 \Delta\varepsilon + C_4 \Delta T, \quad (2)$$

式中  $\Delta\nu_B$  是布里渊频移,  $\frac{\Delta P_B}{P_B}$  是布里渊散射光的强度变化率,  $\Delta T$  是温度变化量,  $\Delta\varepsilon$  是应变变化量,  $C_1$  是  $\Delta\nu_B$  的应变变化系数(单位: MHz/ $\mu\varepsilon$ ),  $C_2$  是  $\Delta\nu_B$  的温度变化系数(单位: MHz/ $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_3$  是  $P_B$  的应变系数(单位: %/ $\mu\varepsilon$ ),  $C_4$  是  $P_B$  的温度系数。

利用上述关系,通过测量沿光纤长度方向的布里渊散射光的频移和强度,就可以得到光纤的温度和应变分布信息,如图 1 所示。

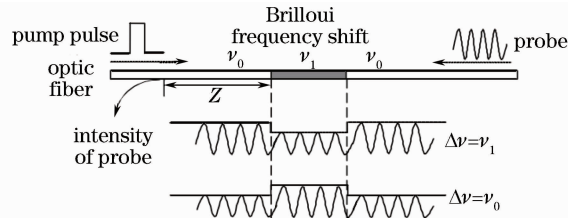


图 1 BOTDA 的分布式传感原理图

Fig. 1 Schematic of distributed sensing based on BOTDA

处于光纤两端的可调谐激光器分别将一脉冲光(抽运光)与一连续(CW)光(探测光)注入光纤,当抽运光和探测光的频差  $\Delta\nu$  与光纤中某区域的布里渊频移  $\Delta\nu_B$  相等时,在该区域两光束之间发生能量转移。当抽运光频率高于探测光频率,差值为  $\Delta\nu_B$  时,能量由抽运光转移到探测光,探测光强度产生增益,表现为布里渊增益型。当抽运光频率比探测光频率低,差值为  $-\Delta\nu_B$  时,能量由探测光转移到抽运光,探测光强度产生损耗,表现为布里渊损耗型。

当抽运光和探测光的频率差与光纤中某区域的布里渊频移相等时,该区域受激布里渊散射作用最强。采集的光探测信号光强可作为时间的函数确定各放大信号点对应光纤的位置;布里渊光与其他散射光谱不重合,因此可从频谱中分辨出各处对应的布里渊频移。由于布里渊频移与温度、应变存在线性关系,因此就可确定相应的应变和温度的大小。

## 3 BOTDA 技术研究进展

Bao 等<sup>[2]</sup>率先在布里渊损耗型 BOTDA 系统研究中取得突出进展,2004 年,他们用保偏光纤实现了  $10\sim 30 \mu\varepsilon$  的应变分辨率和  $1\sim 2 ^{\circ}\text{C}$  温度分辨率。2005 年,他们又采用由斯托克斯光信号强度对频率和位置求二阶偏微分的方法,在入射脉冲宽度为 2 ns 的条件下,实现了空间分辨率 5 cm、应变分辨率  $16 \mu\varepsilon$  的测量<sup>[3]</sup>。2007 年,采用脉冲信号消光比(ER)的信号处理技术使空间分辨率提高<sup>[4]</sup>,并完善了系统偏压控制<sup>[5]</sup>。2009 年,提出使用一对不同宽度的脉冲的布里渊光时域分析方法,在几千米长的光纤中,使用较低的抽运和探测光功率达到了厘米级的空间分辨率<sup>[6]</sup>。他们还通过微波电光调制和色散控制提高测量精度<sup>[5-7]</sup>。2010 年,Soto 等<sup>[8]</sup>提出在抽运光中采用一种所谓归零(RZ)编码的“复杂编码”(Complex coding)技术,在 25 km 的光纤长度上实现了空间分辨率为 1 m 的布里渊增益与频移测量。2012 年,他们又<sup>[9]</sup>提出在 DPP-BOTDA 中采用“复杂编码”技术,在 60 km 的光纤长度上实现了空间分辨率为 25 cm 的布里渊增益与频移

测量。同年,Taki 等<sup>[10]</sup>又提出在 DPP-BOTDA 中采用拉曼散射辅助测量以及“复杂编码”技术,在 93 km 长度的单模光纤中实现了上空间分辨率为 0.5 m、应变和温度精度分别达到  $34 \mu\epsilon/1.7^\circ\text{C}$  的测量。

### 3.1 BOTDA 技术的主要局限

在传统 BOTDA 技术的实现中,存在以下两种局限:1) 单模光纤中,由于偏振模色散(PMD)引起的光纤偏振态的变化使光强的起伏远大于斯托克斯功率,影响光强的测量精度;2) 分辨率决定于脉冲宽度,脉冲越窄,分辨率越高,布里渊增益越弱,信噪比(SNR)越低。而脉冲宽度受声子寿命和信噪比限制<sup>[7]</sup>,当探测光脉冲宽度接近或小于声子寿命(10 ns)时,SBS 效应难以测量,因此脉冲宽度不能无限小。以上限制的存在,严重限制了技术性能的提高。近年来发展出了 PPP-BOTDA、DPP-BOTDA 以及其他技术,以突破上述限制,提高 BOTDA 的性能。

### 3.2 PPP-BOTDA 技术

Kishida 等<sup>[11]</sup>提出在传统的抽运脉冲前采用一个预抽运脉冲以增强精度和空间分辨率的 PPP-BOTDA 技术<sup>[11-12]</sup>。如图 2 所示,测量脉冲  $P_D$  到达预定位置之前,预抽运脉冲  $P_L$  已经激发了声波,因此,即使  $P_D$  的脉冲宽度很窄(目前达到 1 ns),也可以在布里渊增益谱(BGS)中获得预定位置的信息(频移)。

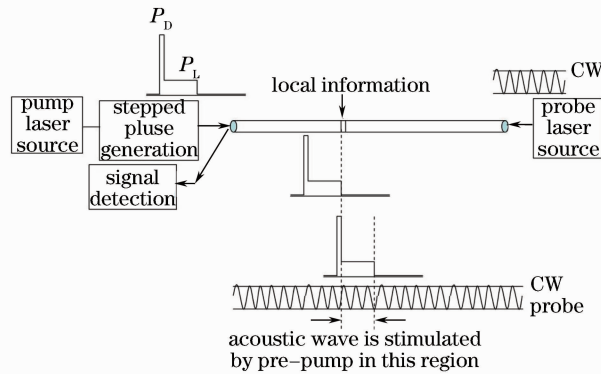


图 2 PPP-BOTDA 技术原理

Fig. 2 Schematic of PPP-BOTDA technique

图 3 所示是采用普通 BOTDA 技术与 PPP-BOTDA 技术对光纤中某一预设应变点测量的 BGS 对比结果,其中横坐标零点为普通 BOTDA 中的 BFS。在图 3 中可以看出,采用 PPP-BOTDA 技术后,布里渊增益谱的半值全宽(FWHM, Full Width at Half Maximum)更小,频率分辨率大为提高,BFS 值也更为准确,其对应的应变/温度解析分辨率大为提高。

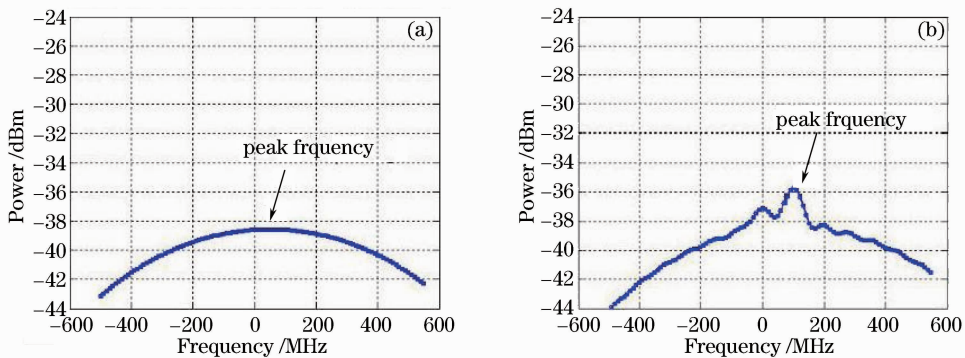


图 3 (a) 传统 BOTDA 与(b) PPP-BOTDA 测量结果的对比

Fig. 3 Comparison of measuring result between (a) traditional BOTDA and (b) PPP-BOTDA

### 3.3 DPP-BOTDA 技术

Li 等<sup>[13]</sup>提出了另一种提高 BOTDA 测量精度的技术思路,称为 DPP-BOTDA 技术。该方案中,抽运脉冲同时输出两个分离的、具有微小脉宽差别的长的脉冲对(例如:脉宽分别为 50 ns 与 40 ns),并在每个布里渊扫频频率上对这两个脉冲的布里渊损耗信号进行相减。所得到的差分布里渊损耗信号具有较窄的线宽

(小于 30 MHz), 并且由于较长的脉冲作用时间, 具有较强的信号强度, 因此提高了布里渊频移测量的精度和 SNR, 差分脉冲对的上升时间差决定了被测位置的空间分辨率。在图 4 中, 图(a)为 40/50 ns 脉冲对在应变区的布里渊信号及其差分信号, 其中 40 ns 脉冲覆盖了 4 m 的范围, 50 ns 脉冲覆盖了 5 m 范围, 而其差分信号覆盖的范围为 1 m, 因此该技术提高了空间分辨率。图(b)为 40/50 ns 脉冲对的差分信号的布里渊损耗谱和 10 ns 脉冲信号的布里渊损耗谱, 可以看出, 差分脉冲对应的布里渊损耗谱的 FWHM 远小于 10 ns 脉冲对应的 FWHM, 其 SNR(Signal Noise Ratio)和频率分辨率也大为提高。

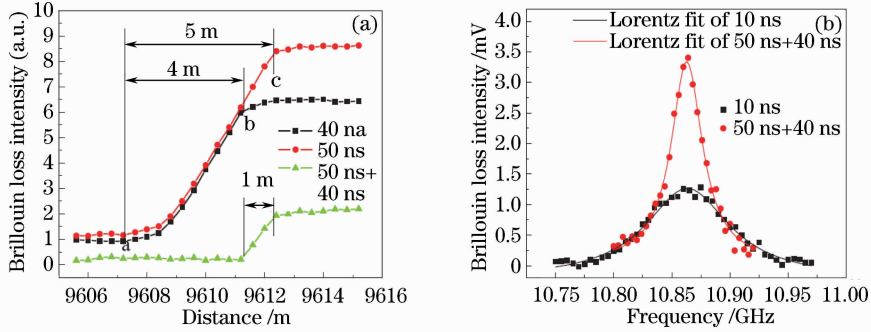


图 4 DPP-BOTDA 信号特征

Fig. 4 Feature of DPP-BOTDA signal

### 3.4 保偏光纤与光子晶体光纤的特性及其在 BOTDA 中的应用

#### 3.4.1 保偏光纤

在常规的 BOTDA 中, 温度与应变的同时测量是通过同时测量斯托克斯光功率(光强)和布里渊频移来实现的。在单模光纤中, 由于光纤偏振态的变化造成的偏振模色散而引起的强度波动占据压倒性地位, 因此, 直接测量由 SBS 引起的强度变化会产生较大的误差; 而在 PMF 中, 由于双折射效应, 其双折射频移(BireFS)与温度和应变也存在线性关系<sup>[14]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{C_B^\epsilon C_{\text{Bire}}^T - C_B^T C_{\text{Bire}}^\epsilon} \times \begin{bmatrix} C_{\text{Bire}}^T & -C_B^T \\ -C_{\text{Bire}}^\epsilon & C_B^\epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta\nu_{\text{Bire}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\Delta\epsilon$ 、 $\Delta T$  是温度与应变的变化,  $C_B^\epsilon$ 、 $C_B^T$ 、 $C_{\text{Bire}}^\epsilon$ 、 $C_{\text{Bire}}^T$  分别是应变与温度相对于 BFS 和 BireFS 的系数。其中  $C_B^\epsilon$ 、 $C_B^T$ 、 $C_{\text{Bire}}^\epsilon$  是正值,  $C_{\text{Bire}}^T$  是负值, 因此  $C_B^\epsilon C_{\text{Bire}}^T - C_B^T C_{\text{Bire}}^\epsilon$  是一个较大的值, 因而保证了较高的辨别精度。利用上述关系, 只需测得 PMF 中某处的 BFS 和 BireFS, 就可同时得到该处的温度与应变。

#### 3.4.2 光子晶体光纤

Zou 等<sup>[15]</sup>对一种掺锗氧化硅纤芯的光子晶体光纤特性进行研究发现其具有多峰值布里渊谱特性。这表明, 采用这种光纤可以同时进行基于布里渊散射的分布式温度与应变测量, 而不需测量布里渊背向散射强度。

在 PCF 中, 由于纤芯采用了两种不同的掺杂材料, 两个布里渊峰值对应的温度系数与应变系数都不相同, 其关系为

$$\Delta T = \frac{\Delta\nu_B^{\text{pk2}} C_\epsilon^{\text{pk1}} - \Delta\nu_B^{\text{pk1}} C_\epsilon^{\text{pk2}}}{C_\epsilon^{\text{pk1}} C_T^{\text{pk2}} - C_\epsilon^{\text{pk2}} C_T^{\text{pk1}}}, \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\nu_B^{\text{pk2}} C_T^{\text{pk1}} - \Delta\nu_B^{\text{pk1}} C_T^{\text{pk2}}}{C_\epsilon^{\text{pk1}} C_T^{\text{pk2}} - C_\epsilon^{\text{pk2}} C_T^{\text{pk1}}}, \quad (5)$$

式中  $C_\epsilon^{\text{pk1}}$ 、 $C_\epsilon^{\text{pk2}}$ 、 $C_T^{\text{pk1}}$ 、 $C_T^{\text{pk2}}$  分别对应两个主频谱峰值的应变系数和温度系数,  $\Delta\nu_B^{\text{pk1}}$ 、 $\Delta\nu_B^{\text{pk2}}$  分别对应两个主频谱峰值的频移。此, 得到 PCF 中某处的布里渊频移的两个主频谱峰值, 就可同时得到该处的温度与应变。

利用上述两种光纤避免了测量光强引起的误差, 但需要指出的是, 无论是 PMF 中 BFS 和 BireFS 的应变系数和温度系数, 还是 PCF 中两个主频谱峰值的应变系数和温度系数, 其差别都很小。因此, 需要精确测量得到上述系数, 这两种方法才具有实用意义。

## 4 结 论

近年来,基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术在加拿大、日本、瑞士等发达国家得到了飞速发展。本文针对传统 BOTDA 技术难以突破空间分辨率限制的问题,介绍了两种提高空间分辨率的新技术方法,阐明了其实现原理。介绍了两种能同时得到温度和应变的新技术方法,说明了其无需测量信号强度从而提高测量精度的技术原理。

### 参 考 文 献

- 1 Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1296–1302.
- 2 Bao X, Zou L, Yu Q, *et al.*. Development and applications of the distributed temperature and strain sensors based on Brillouin scattering[C]. *Proceedings of IEEE Sensors*, 2004, 3: 1210–1213.
- 3 Yu Q, Bao X, Fabien R, *et al.*. Simple method to identify the spatial location better than the pulse length with high strain accuracy[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(17): 2215–2217.
- 4 Fabien R, Bao X, Li Y, *et al.*. Signal processing technique for distributed Brillouin sensing at centimeter spatial resolution [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(11): 3610–3618.
- 5 Jeffrey S, Li Y, Fabien R, *et al.*. Stabilization of electro-optic modulator bias voltage drift using a lock-in amplifier and a proportional integral derivative controller in a distributed Brillouin sensor system[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(9): 1482–1485.
- 6 Bao X, Li W, Li Y, *et al.*. Distributed fiber sensor based on stimulated Brillouin scattering with centimeter spatial resolution[C]. *2008 International Conference on Optical Instruments and Technology: Microelectronic and Optoelectronic Devices and Integration*, 2009.
- 7 Bao X, Chen L. Recent progress in optical fiber sensors based on Brillouin scattering at university of Ottawa[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(2): 102–117.
- 8 Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors[J]. *Opt Express*, 2010, 18(14): 14878–14892.
- 9 Soto M A, Taki M, Bolognini G, *et al.*. Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using simplex codes and optical pre-amplification[J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 6860–6869.
- 10 Taki M, Soto M A, Bolognini G, *et al.*. Raman-assisted DPP-BOTDA sensor employing simplex coding with sub-meter scale spatial resolution over 93 km standard SMF[C]. *SPIE*, 2012, 8421: 84219M.
- 11 Kishida K, Li C H, Nishiguchi K. Pulse pre-pump method for cm-order spatial resolution of BOTDA[C]. *SPIE*, 2005, 5855: 559–562.
- 12 Kishida K, Li C H. Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system[C]. *Proceedings of Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, 2006, 5: 471–477.
- 13 Li W, Bao X, Li Y, *et al.*. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 21616–21625.
- 14 Dong Y, Chen L, Bao X. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(18): 1364–1366.
- 15 Zou L, Bao X, Afshar V S, *et al.*. Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(13): 1485–1487.