

# 损耗型矢量布里渊光时域分析光纤传感技术

李永倩 安 琪\* 李晓娟 何玉钧 张立欣

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

**摘要** 提出了一种损耗型矢量布里渊光时域分析光纤传感技术,通过构建基于外差检测的模拟实验系统测量受激布里渊散射幅度损耗谱和相移谱,实现了 50 m 传感光纤的温度测量。结果表明,通过测量相移谱获得的布里渊频移与通过测量幅度损耗谱获得的布里渊频移基本一致,且均与温度呈良好的线性关系;由损耗型矢量布里渊光时域分析技术获得的布里渊频移的温度系数为 1.16 MHz/°C,与传统布里渊光时域分析技术获得的 1.2 MHz/°C 具有良好的一致性。根据理论和实验结果,分析了损耗型矢量布里渊光时域分析光纤传感技术的优势。

**关键词** 光纤光学; 矢量布里渊光时域分析; 受激布里渊散射; 相移; 外差检测; 模拟实验

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0906004

## Optical Fiber Sensing Technology Based on Loss Vector Brillouin Optical Time Domain Analysis

Li Yongqian An Qi Li Xiaojuan He Yujun Zhang Lixin

*Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University,  
Baoding, Hebei 071003, China*

**Abstract** An optical fiber sensing technology based on loss vector Brillouin optical time domain analysis (VBOTDA) is proposed. By constructing a heterodyne detection based simulation experiment system, the amplitude loss spectrum and phase shift spectrum of stimulated Brillouin scattering (SBS) are measured, and the temperature measurement of 50 m long sensing fiber is realized. The results show that the Brillouin frequency shifts obtained by SBS phase shift spectrum measurement agree basically with that obtained by amplitude loss spectrum measurement, and that both show a good linear relationship with the temperature. The temperature coefficient of Brillouin frequency shift obtained by loss VBOTDA is 1.16 MHz/°C, which is well consistent with the result of 1.2 MHz/°C obtained by conventional BOTDA system. According to the theoretical and experimental results, the advantages of the proposed technology are analyzed.

**Key words** fiber optics; vector Brillouin optical time domain analysis; stimulated Brillouin scattering; phase shift; heterodyne detection; simulation experiment

**OCIS codes** 060.2370; 290.5900; 040.2840

## 1 引 言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术具有测量精度高、定位准确等优点,已成为国内外研究的热点<sup>[1-5]</sup>,其中,基于受激布里渊散射(SBS)的布里渊光时域分析(BOTDA)传感器因其能对温度/应变进行长距离高精度测量<sup>[6-7]</sup>,在石油管道、电力电缆等设施的安全监控方面得到了广泛应用。在光纤中相向传输、频率相差布里渊频移的激励光与探测光发生 SBS 作用时,不但会产生能量转移,而且会发生相位变化<sup>[8-9]</sup>。传

**收稿日期:** 2016-03-10; **收到修改稿日期:** 2016-04-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(61377088)、河北省自然科学基金(F2014502098)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015XS114)

**作者简介:** 李永倩(1958—),男,博士,教授,主要从事光通信与光传感方面的研究工作。

E-mail: liyongqian1958@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: an-qi.122@163.com

统的 BOTDA 系统利用连续探测光和脉冲激励光之间的 SBS 能量转移作用,直接检测探测光的功率,通过改变两束光之间的频率差,得到沿光纤传输的探测光的功率谱。由于当两束光的频率差与光纤布里渊频移一致时 SBS 作用最强,探测光功率最大,因此探测光功率谱峰值对应的频率差即为光纤布里渊频移。利用布里渊频移与温度/应变的关系即可实现沿光纤的温度/应变测量,但这种直接检测法无法获取探测光的相位信息,因此无法利用 SBS 作用的相移响应进行传感测量。2010 年, Dossou 等<sup>[10]</sup>设计出一种矢量布里渊光时域分析(VBOTDA)仪,成功测得了 SBS 的相移谱。自此,基于 SBS 相移的分布式光纤传感器逐渐出现。2012 年, Zornoza 等<sup>[11]</sup>提出了基于自外差和射频同步解调技术的 BOTDA 系统,实现了沿光纤 SBS 相移谱的分布式测量,提高了系统的信噪比,延长了传感距离。2014 年, Tu 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于正交解调算法的 VBOTDA 系统,同时测量了沿光纤的 SBS 幅度谱和相移谱。与传统 BOTDA 技术相比,VBOTDA 技术采用外差检测方案可减小光源频率漂移带来的影响,同时可降低系统中的低频强度噪声和相位噪声<sup>[10]</sup>,在不引入其他非线性效应的条件下提高了系统的信噪比。

基于以上研究,本文进一步提出一种基于损耗型 SBS 机理的 VBOTDA 温度/应变传感技术,在建立系统温度/应变传感模型的基础上,搭建基于外差检测和相移测量的损耗型 VBOTDA 模拟实验系统,实现传感光纤的温度测量。

## 2 损耗型 VBOTDA 温度/应变传感原理

与传统 BOTDA 系统的直接检测方法不同,VBOTDA 系统通过引入一个与抽运光同向传输的本振光,利用外差检测实现信号幅度和相位的测量。损耗型 VBOTDA 原理如图 1 所示,图中  $E_s$ 、 $E_p$  和  $E_L$  分别为 Stokes 光、抽运光和本振光的幅度, $\nu_s$ 、 $\nu_p$  和  $\nu_L$  分别为 Stokes 光、抽运光和本振光的频率, $\nu_B$  为光纤的布里渊频移, $\nu_0$  为抽运光与本振光之间的频率差。设置  $\nu_0$  远大于布里渊谱宽,保证本振光不与 Stokes 光发生 SBS 作用。损耗型 VBOTDA 中,抽运光与本振光从光纤  $z=0$  端注入,Stokes 光从光纤  $z=L$  端注入,当 Stokes 光与抽运光之间的频率差在布里渊谱作用范围内时,二者发生 SBS 作用。因  $\nu_p > \nu_s$ ,抽运光向 Stokes 光转移能量,抽运光被损耗的同时发生相位改变。

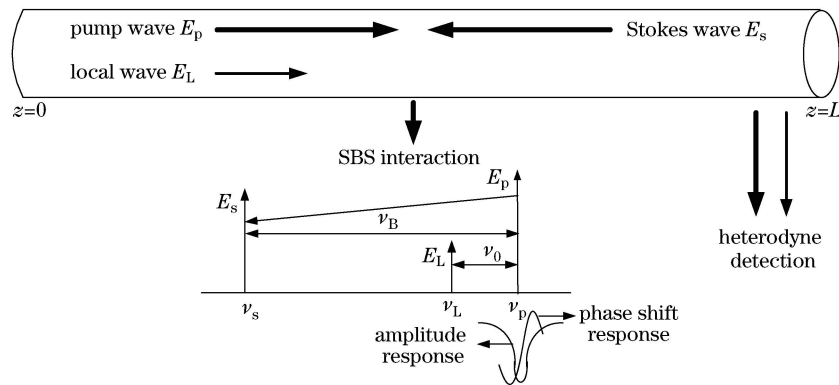


图 1 损耗型 VBOTDA 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loss VBOTDA

由光纤  $z=L$  端输出的检测光包含发生 SBS 作用的抽运光和不发生 SBS 作用的本振光,可表示为

$$E_T(z, \nu) = E_p \exp(i2\pi\nu_p t) H_{SBS} + E_L \exp[i2\pi(\nu_p - \nu_0)t], \quad (1)$$

式中  $H_{SBS}$  为抽运光的 SBS 传输函数,近似为

$$H_{SBS} = \exp\left(-\frac{I_s \Delta z g_B}{1 + 2i\Delta\nu/\Delta\nu_B}\right) = \exp(g_{SBS}) \exp(i\varphi_{SBS}), \quad (2)$$

其中  $I_s$  为 Stokes 光强度,  $\Delta z$  为光纤作用长度,  $g_B$  为布里渊增益峰值,  $\Delta\nu_B$  为布里渊谱宽,  $\Delta\nu = \nu_s - \nu_p + \nu_B$  为抽运光和 Stokes 光之间的频率差相对光纤布里渊频移的失谐参量,  $g_{SBS}$  和  $\varphi_{SBS}$  分别为 SBS 作用的幅度和相移响应。

假设  $g_{SBS} \ll 1$ , 则(1)式可表示为

$$E_T(z, \nu) = (1 - g_{\text{SBS}})E_p \exp[i(2\pi\nu_p t + \varphi_{\text{SBS}})] + E_L \exp[i2\pi(\nu_p - \nu_0)t]. \quad (3)$$

经外差检测后的拍频信号为

$$I(\nu_0) = R(1 - g_{\text{SBS}})E_p E_L \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi_{\text{SBS}}), \quad (4)$$

式中  $R$  为光电检测器的响应度。

由(4)式可知,拍频信号中包含 SBS 作用的幅度和相移响应,解决了传统 BOTDA 系统无法检测 SBS 相移响应的问题。通过拍频信号的幅度和相移,可获得 SBS 幅度损耗谱和相移谱,分别表示为

$$g_{\text{SBS}}(P_s, \Delta\nu) = \frac{P_s}{A_{\text{eff}}} \frac{g_B \Delta\nu_B^2}{4\Delta\nu^2 + \Delta\nu_B^2} \Delta z, \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{SBS}}(P_s, \Delta\nu) = \frac{P_s}{A_{\text{eff}}} \frac{2g_B \Delta\nu_B \Delta\nu}{4\Delta\nu^2 + \Delta\nu_B^2} \Delta z, \quad (6)$$

式中  $P_s = I_s \times A_{\text{eff}}$  为 Stokes 光功率,  $A_{\text{eff}}$  为光纤纤芯有效作用面积。按表 1 所示设置参数,改变频率失谐  $\Delta\nu$ ,可绘出如图 2 所示的 SBS 损耗相移谱。

表 1 典型光纤参数

Table 1 Typical optical fiber parameters

Parameter	$g_B / (\text{m/W})$	$\Delta\nu_B / \text{MHz}$	$\Delta z / \text{m}$	$\nu_B / \text{GHz}$	$A_{\text{eff}} / \text{m}^2$
Value	$5 \times 10^{-11}$	30	50	10.86	$64 \times 10^{-12}$

图 2 中,纵坐标为  $\varphi_{\text{SBS}}$  对  $g_B$ 、 $P_s$  和  $\Delta z$  乘积的归一化值。由图 2 可知,当  $\Delta\nu$  为 0,即抽运光与 Stokes 光的频率差为光纤的布里渊频移时, SBS 相移为  $0^\circ$ ,因此通过测量 SBS 相移谱可获得光纤的布里渊频移。光纤布里渊频移与介质的弹性力学和热弹性力学特性有关,光纤温度或应变变化会引起介质相关特性的改变,从而影响布里渊频移。通过检测光纤布里渊频移的变化,即可得到光纤上的温度或应变。

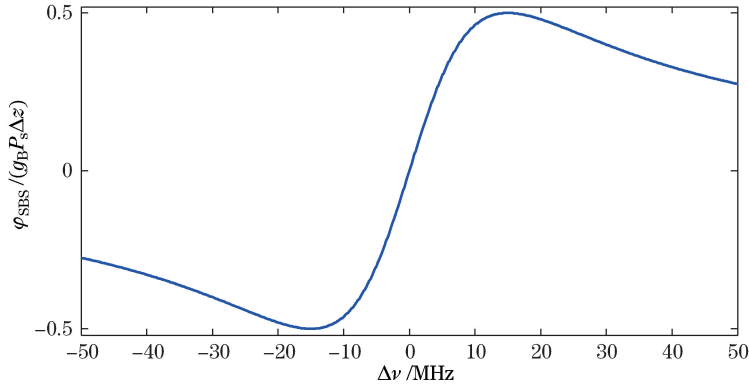


图 2 SBS 损耗相移谱

Fig. 2 Phase shift spectrum of SBS loss

布里渊频移  $\nu_B$  与温度  $T$ 、应变  $\epsilon$  的关系为<sup>[13-14]</sup>

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)], \quad (7)$$

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)[1 + C_\epsilon \epsilon], \quad (8)$$

式中  $T_r$  为参考温度,  $C_T = 1.18 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  和  $C_\epsilon = 4.48$  分别为温度和应变的比例系数。对于常温下工作在光波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  附近的普通单模光纤,布里渊频移变化为

$$\delta\nu_B = C_{\nu T} \delta T + C_{\nu \epsilon} \delta \epsilon, \quad (9)$$

式中  $C_{\nu T} = (1.20 \pm 0.02) \text{ MHz}/^\circ\text{C}$  为布里渊频移的温度系数,  $C_{\nu \epsilon} = (0.0483 \pm 0.0004) \text{ MHz}/\mu\epsilon$  为布里渊频移的应变系数<sup>[15]</sup>。由(7)和(8)式可见,  $\nu_B$  与  $T$ 、 $\epsilon$  均呈线性关系。由(7)式和(8)式计算可知,  $1^\circ\text{C}$  温度变化引起的  $\nu_B$  变化可以等效为  $25 \mu\epsilon$  应变变化引起的  $\nu_B$  变化。在以下实验中,从实验的难易角度出发,温度被用作传感参量,结果可同样适用于应变传感。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验装置

验证损耗型 VBOTDA 传感系统的可行性的模拟实验装置,如图 3 所示。系统选用线宽为 10.3 kHz、中心波长为 1550 nm 的窄谱激光器作光源,光源输出的连续光由保偏耦合器(PM coupler)分为两路:上支路经掺铒光纤放大器 1(EDFA1)放大、由环行器 1 和光栅 1(Bragg grating 1)组成的滤波器滤除放大自发辐射(ASE)噪声,再由扰偏器(PS)扰偏后作为 Stokes 光经环行器 3 进入传感光纤(PS 的作用是通过扰乱 Stokes 光的偏振态,减小抽运光与 Stokes 光偏振态不一致导致的 SBS 作用的起伏);下支路由微波频率合成器驱动的电光调制器(EOM)调制为抑制载波的双边带信号,并进入 EDFA2 放大,经由环行器 2 和光栅 2 组成的光滤波器滤除下边带和 ASE 噪声后作为抽运光进入马赫-曾德干涉仪(MZI)。MZI 的上臂中插入偏振控制器(PC)控制抽运光偏振态,以保证本振光与抽运光之间的拍频信号最大;下臂由驱动频率为 200 MHz 的声光频移器(AOFS)下移频后作为本振光。包含抽运光和本振光的 MZI 输出信号由耦合器 2 分为两路:一路进入传感光纤,与相向传输的 Stokes 光发生 SBS 作用,由光电探测器 1(PD1)进行外差检测,提取频率为 200 MHz 的拍频信号作为检测信号;另一路直接由 PD2 进行外差检测,提取相同频率的拍频信号作为本系统引入的一个参考信号。隔离器(ISO)用来保证 MZI 不受 Stokes 光影响。示波器(OSC)通道 1 采集发生 SBS 作用的检测信号,通道 2 采集未发生 SBS 作用的参考信号,利用 OSC 相移测量功能,检测二者的相位差即可实现 SBS 相移的测量;检测信号和参考信号幅度的比值即为 SBS 幅度损耗。在图 3 所示实验系统中,根据分布式光纤传感系统空间分辨率与脉冲宽度的对应关系,通过改变传感光纤长度,在抽运端注入连续光、在 PM Coupler 上支路插入 EOM,产生不同宽度的 Stokes 注入光脉冲,可以对损耗型 VBOTDA 系统进行模拟实验研究。

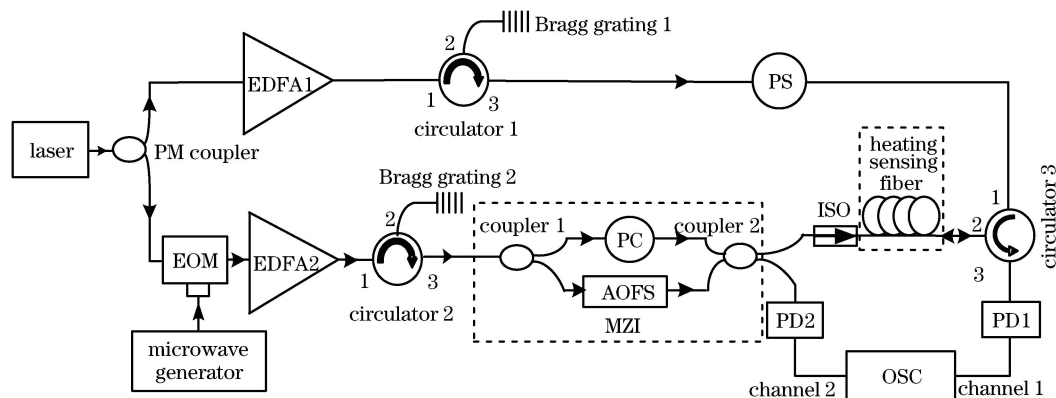


图 3 损耗型 VBOTDA 模拟实验系统

Fig. 3 Simulation experiment setup of the loss VBOTDA system

#### 3.2 实验结果

分别设置 Stokes 光入纤功率为 100 mW、抽运光入纤功率为 4 mW,因受设备性能限制,所能获得的本振光入纤功率为 100  $\mu$ W。选择长度为 50 m 的普通单模通信光纤 G.652 作传感光纤,将其呈自然松弛状态放置于恒温水箱中。水温由 23.3  $^{\circ}$ C 升至 63.3  $^{\circ}$ C,每隔 10  $^{\circ}$ C 记录 1 组 SBS 相移谱和幅度损耗谱数据。为了保证测量的准确性,每次温度达到设定值后稳定 10 min,使温度对光纤布里渊散射谱的影响达到稳定,然后进行扫频读取数据。每一个温度点下,在 10.788~10.98 GHz 范围内,以 4 MHz 为步进幅度改变微波频率合成器的频率,调节抽运光和 Stokes 光的频率差,记录每一个频率点时 OSC 通道 1、通道 2 的信号幅度以及二者的相位差数据;通道 1 信号幅度与通道 2 信号幅度之比即为 SBS 幅度损耗值,通道 1 信号和通道 2 信号的相位差即为 SBS 相移;在整个实验过程中,要保证入射光功率稳定,且保持传感光纤始终处于松弛状态。按上述方法对每个温度点下的 SBS 相移谱和幅度损耗谱进行 3 次测量,求 3 次测量数据的平均值,并利用最小均方根拟合算法对实验数据进行拟合,所得拟合曲线如图 4(a)和(b)所示。

由图 4(a)可知,测得的 SBS 幅度损耗谱与(5)式吻合,其幅度损耗谱峰值对应的两束光的频率差为光纤布里渊频移;温度不同时,SBS 幅度损耗谱峰值对应的布里渊频移不同,温度越高,布里渊频移越大。由图



4(b)可知,测得的 SBS 相移谱与(6)式和图 2 吻合,相移为  $0^\circ$  处对应的两束光的频率差为光纤布里渊频移;与幅度损耗谱类似,温度不同时,SBS 相移谱对应的布里渊频移不同,温度越高,布里渊频移越大。

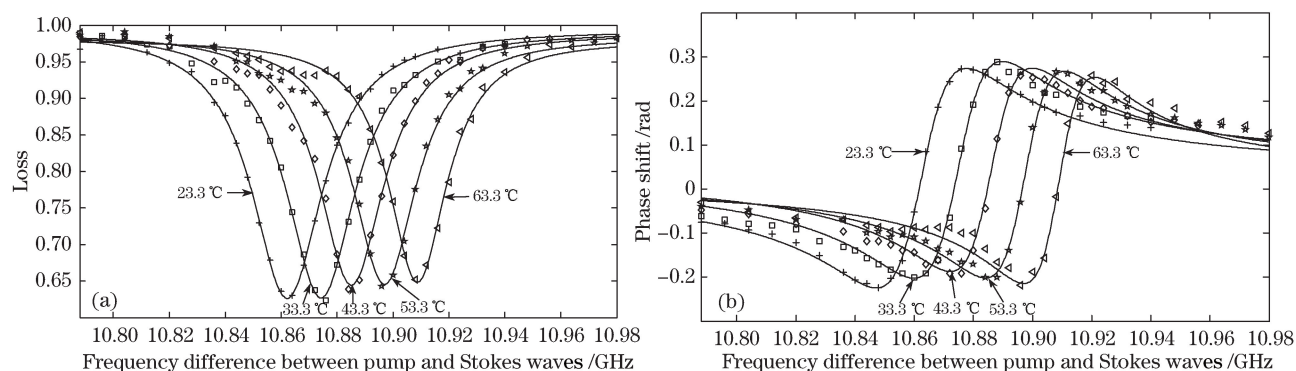


图 4 (a)不同温度下的 SBS 幅度损耗谱;(b)不同温度下的 SBS 相移谱

Fig. 4 (a) SBS amplitude loss spectra at different temperatures; (b) SBS phase shift spectra at different temperatures

为了进一步阐明 SBS 幅度损耗谱和相移谱对温度的依赖特性,图 5 给出了由 SBS 幅度损耗谱和相移谱得到的布里渊频移与温度的关系曲线。

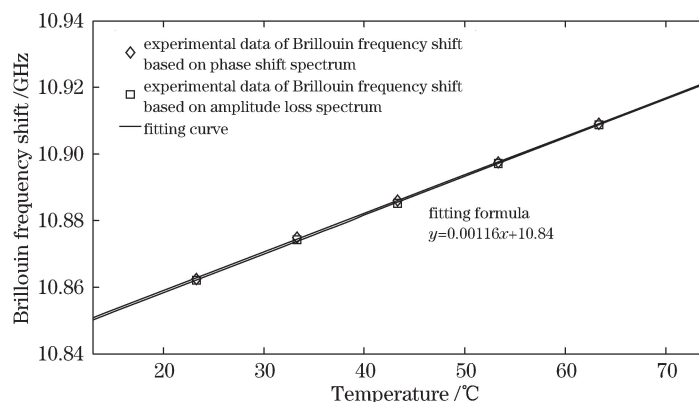


图 5 SBS 幅度损耗谱和相移谱的布里渊频移与温度的关系

Fig. 5 Temperature dependence on Brillouin frequency shifts obtained from SBS amplitude loss and phase shift spectra

由图 5 可知,温度相同时,通过幅度损耗谱和通过相移谱测量的布里渊频移值基本相同;由两种谱获得的布里渊频移均随温度的升高而呈线性增加的趋势。测量值和拟合曲线的均方根误差为  $0.0003 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ ,根据测量数据拟合获得的布里渊频移的温度系数为  $1.16 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ ,由(7)~(9)式计算可得等效布里渊频移应变系数为  $0.0464 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ ,与传统 BOTDA 技术测得的结果  $1.20 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$  和  $0.0483 \text{ MHz}/\mu\epsilon$  具有良好的一致性。需要说明的是,由于布里渊频移的温度系数和应变系数受光纤纤芯掺杂种类和浓度的影响<sup>[16]</sup>,不同类型光纤的布里渊频移的温度、应变系数可能存在微小的差异。

### 3.3 分析与讨论

由上述实验结果可知,损耗型 VBOTDA 系统可实现 SBS 幅度响应和相移响应的测量。损耗型 VBOTDA 系统利用 SBS 相移谱可以测量光纤的布里渊频移,并且测得的布里渊频移及其温度系数与通过幅度损耗谱测得的结果相同,与传统 BOTDA 系统获得的结果具有良好的一致性,因此,通过 SBS 损耗相移谱测量布里渊频移可实现光纤温度/应变的测量。受实验条件限制,仅在 50 m 传感光纤上入射连续抽运光和 Stokes 光进行基于损耗型 VBOTDA 的分布式温度传感模拟实验,这种情况与入射宽度为 500 ns 的 Stokes 光脉冲入射对应的 50 m 空间分辨率光纤上的作用情况相同,因此可认为本实验中的空间分辨率至少为 50 m。与传统 BOTDA 技术中布里渊散射谱在脉冲宽度小于声子寿命时严重展宽、频率测量精度明显下降不同,损耗型 VBOTDA 系统利用变化率较大的 SBS 相移谱过零点来确定布里渊频移,脉宽变窄对布里渊频移测量精度的影响小。由于损耗型 SBS 相移与 Stokes 光功率成正比,实际应用中可通过提高 Stokes 光脉冲功率来减小由脉宽变窄造成的 SBS 相移降低的程度,所以相对传统 BOTDA 技术来说,损

耗型 VBOTDA 可有效地提高系统的空间分辨率。由(4)~(6)式可知,幅度损耗谱除受 Stokes 光功率影响外,还受抽运光功率的影响,而损耗型相移谱基本不受抽运光功率的影响,因此非本地效应小;利用 SBS 相移谱,受相干噪声、偏振噪声引起的强度变化影响小,系统信噪比高;VBOTDA 技术采用外差检测方案,可在不增加抽运光和 Stokes 光功率的条件下,通过增加本振光功率来提高系统信噪比,减小其他非线性效应的影响。与利用增益谱的 VBOTDA 系统的 SBS 相移谱不同,损耗型 VBOTDA 系统中 Stokes 光是脉冲光,所以 SBS 作用的抽运损耗小;根据前期研究结果,损耗型 SBS 相移谱受连续探测光功率影响小,故非本地效应小。因此,损耗型 VBOTDA 光纤温度/应变传感技术有望获得优于利用增益谱的 VBOTDA 系统的性能。

## 4 结 论

提出了一种损耗型 VBOTDA 光纤温度/应变传感技术,构建了损耗型 VBOTDA 模拟实验系统,在 50 m 传感光纤上实现了 SBS 幅度损耗谱和相移谱的温度特性测量。实验结果表明,在损耗型 VBOTDA 系统中通过测量 SBS 相移谱和幅度损耗谱获得的布里渊频移基本相同,且均与温度呈良好线性关系;损耗型 VBOTDA 系统获得的布里渊频移及其温度系数与传统 BOTDA 系统获得的结果具有良好的一致性。该研究结果证明了基于 SBS 相移测量的损耗型 VBOTDA 技术可实现分布式光纤温度/应变的测量,与已报道的 BOTDA 技术相比,它具有抽运损耗小、非本地效应小、信噪比高的优势,在长距离传感和高精度测量领域有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.* Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205007.  
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007.
- 2 Liu Wenzhe, Zhang Yanjun, Fu Xinghu, *et al.* A model research of BOTDR signal processing based on G-Simplex coding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 090601.  
刘文哲, 张燕君, 付兴虎, 等. 基于 G-Simplex 编码的 BOTDR 信号处理模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 090601.
- 3 Wang Xue, Lu Yuangang, Zhang Xuping, *et al.* Calculation method of strain and temperature coefficients for fibers with multimode acoustic waveguide structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0606003.  
王 雪, 路元刚, 张旭莘, 等. 多模声波导结构光纤的应变与温度系数计算方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0606003.
- 4 Li Yongqian, Li Xiaojuan, An Qi. New method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106003.  
李永倩, 李晓娟, 安 琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003.
- 5 Li Yongqian, Zhao Xu, Zhao Lijuan, *et al.* Brillouin scattering parameters of different modes in multimode optical fibers [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(3): 0319002.  
李永倩, 赵 旭, 赵丽娟, 等. 多模光纤不同模式布里渊散射参数[J]. 光子学报, 2015, 44(3): 0319002.
- 6 Angulo-Vinuesa X, Martin-Lopez S, Corredera P, *et al.* Raman-assisted Brillouin optical time-domain analysis with sub-meter resolution over 100 km[J]. Opt Express, 2012, 20(11): 12147-12154.
- 7 Soto M A, Taki M, Bolognini G, *et al.* Simplex-coded BOTDA sensor over 120-km SMF with 1-m spatial resolution assisted by optimized bidirectional Raman amplification[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(20): 1823-1826.
- 8 Robert W B. Nonlinear optics[M]. New York: Academic Press, 2007: 436-453.
- 9 Govind P A. Nonlinear fiber optics[M]. New York: Academic Press, 2001: 359-364.
- 10 Dossou M, Bacquet D, Szriftgiser P. Vector Brillouin optical time-domain analyzer for high-order acoustic modes[J]. Opt Lett, 2010, 35(22): 3850-3852.
- 11 Zornoza A, Sagues M, Loayssa A. Self-heterodyne detection for SNR improvement and distributed phase-shift measurements in BOTDA[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(8): 1066-1072.
- 12 Tu X B, Sun Q, Chen W, *et al.* Vector Brillouin optical time-domain analysis with heterodyne detection and IQ demodulation algorithm[J]. IEEE Photonics J, 2014, 6(2): 6800908.

- 13 Naruse H, Tateda M, Ohno H, *et al.* Dependence of the Brillouin gain spectrum on linear strain distribution for optical time-domain reflectometer-type strain sensors[J]. Appl Opt, 2002, 41(34): 7212-7217.
- 14 Kurashima T, Horiguchi T, Ohno H, *et al.* Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques[C]. 24th European Conference on Optical Communication, 1998, 1: 149-150.
- 15 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1111-1114.  
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1111-1114.
- 16 Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(10): 1842-1851.