



DOI: 10.12086/oe.2018.170484

长距离分布式布里渊光纤传感关键技术进展分析

王本章, 逢超, 周登望, 董永康*

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 布里渊光纤传感通过光纤中受激布里渊散射效应实现温度和应变测量, 具有空间分辨率高、传感距离长和测量精度高等特点, 因此分布式布里渊光纤传感成为近年的研究热点。本文通过对长距离分布式布里渊光纤传感研究进展的调研和分析, 概括了长距离布里渊传感面临的主要限制因素和解决的关键技术, 重点介绍了基于时分复用、频分复用、脉冲编码、宽带频率调制和图像处理算法的长距离布里渊光纤传感技术。随着长距离布里渊光纤传感器的实际工程化, 对于快速测量的需求愈发显著, 这将是未来长距离布里渊光纤传感的主要研究方向。

关键词: 受激布里渊散射; 布里渊光时域分析; 光纤传感; 非线性光学

中图分类号: O436.3; TN253

文献标志码: A

引用格式: 王本章, 逢超, 周登望, 等. 长距离分布式布里渊光纤传感关键技术进展分析[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170484

Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing

Wang Benzhang, Pang Chao, Zhou Dengwang, Dong Yongkang*

National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract: Brillouin fiber sensing using stimulated Brillouin scattering in fibers to measure temperature and stress with the features of high-spatial resolution, long sensing range, small measurement error, etc. Therefore, Brillouin fiber sensing becomes the hotspot in recent two or three decades. Through research and analysis on the progress of long range distributed Brillouin sensing, main limitations and key techniques are generalized in this paper. Long range sensing schemes based on time division multiplexing, frequency division multiplexing, pulse coding, wide-bandwidth frequency modulation and image processing methods are emphatically introduced here. With long range Brillouin sensors applied in practice, increasing demand for fast measurement emerges, which we believe will be dominant in the research of long range Brillouin fiber sensing in the future.

Keywords: stimulated Brillouin scattering; Brillouin optical time domain analysis; optical fiber sensing; nonlinear optics

Citation: Wang B Z, Pang C, Zhou D W, *et al.* Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170484

收稿日期: 2017-12-05; 收到修改稿日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575052); 国家重大科学仪器设备开发重大专项(2017YFF0108700)

作者简介: 王本章(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wangbenzhang@hotmail.com

通信作者: 董永康(1981-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学、光纤传感和结构健康监测方面的研究。

E-mail: aldendong@163.com

1 引言

分布式光纤传感技术是近二三十年发展起来的新型传感技术,其基本原理为利用光纤同时传输和感知信号,与传统的点式光纤传感器相比,实现真正意义上的分布式测量。分布式光纤传感可以对光纤上成千上万个点的温度和应变信息进行测量,这是其它传感技术无法比拟的优势。目前主要有基于瑞利散射^[1-2]、布里渊散射^[3-4]和拉曼散射^[5]的分布式光纤传感技术,其中基于布里渊散射的分布式光纤传感技术的传感点数已经超过一百万^[6]。

布里渊散射是光纤中常见的非线性散射效应,散射光相对入射光有一定的频率差,称为布里渊频移,频移大小与温度或应变成线性对应关系^[7-8]。通过探测光纤的布里渊频移即可推知温度或应力等的变化。布里渊光时域分析(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)技术是基于受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)的光纤传感典型技术代表之一,目前其性能参数在空间分辨率、测量距离和测量时间上都取得较大的进步,空间分辨率达到 1 cm^[6],传感距离达到 150 km^[9],并且可以实现 kHz 量级的动态测量^[10]。

现如今,桥梁、隧道和油气管道等大型基础设施快速建设,电网大范围覆盖。基础设施的安全性和可靠性一直是社会关注的焦点,而长距离分布式布里渊光纤传感技术可以为结构健康监测和温度监测提供行之有效的解决方案。迫切的应用需求使得长距离分布式布里渊光纤传感成为研究热点。2010年,瑞士联邦工学院的 Soto 等人首次将脉冲编码技术引入到布里渊光纤传感中,有效地提高了系统信噪比,实现 50 km 布里渊光纤传感,空间分辨率为 1 m,远端测量精度为 2.2 °C 或 44 με^[11]。2012年,Soto 等人又提出利用预放大技术^[12]和拉曼放大技术^[13]进一步提高传感距离,都实现 120 km 长距离分布式布里渊光纤传感。2011年,加拿大渥太华大学董永康等提出利用时分复用技术,降低 SBS 作用距离,避免泵浦抽空和非局域效应,调节泵浦脉冲与探测脉冲的时间延迟控制 SBS 发生的位置,多次分段测量实现 100 km 长距离分布式布里渊光纤传感^[14]。2012年,该课题组提出基于频分复用技术的长距离分布式布里渊光纤传感技术,结合中继放大技术实现 2 m 空间分辨率 150 km 超长距离传感^[9]。2016年,西班牙的 Mompó 等人提出采用宽带频率调制的探测光进行长距离布里渊光纤传感,在布

里渊衰减谱的系统中脉冲光得到平坦增益,增强远端信噪比同时避免非局域效应,实现 100 km 高性能分布式布里渊光纤传感^[15]。同年瑞士的 Luc 课题组实现基于图像处理的高性能长距离分布式布里渊光纤传感,在不改变硬件的基础上,50 km 传感距离信噪比提高 14 dB^[16]。更高的信噪比意味着更长的传感距离,该课题组利用图像处理降噪算法实现 200 km 超长距离布里渊光纤环路传感,空间分辨率为 2 m^[17]。

本文将从理论上探讨长距离分布式布里渊光纤传感的限制因素,并综述近年长距离分布式布里渊光纤传感的关键技术和研究结果。

2 理论分析

BOTDA 系统的示意图,如图 1 所示,一束光作为泵浦光,进行脉冲调制实现分布式测量,脉冲宽度决定系统空间分辨率;另一束光是连续光,进行频率调制(与泵浦光频差在光纤布里渊频移附近);泵浦光和探测光分别从光纤两端进入待测光纤,发生 SBS 作用。对 SBS 放大后的探测光进行采集处理,扫描探测光频率,重构出光纤布里渊增益谱。

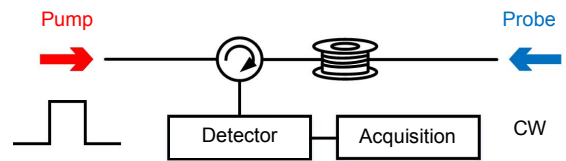


图 1 BOTDA 系统示意图

Fig. 1 The operation principle of BOTDA system

利用洛伦兹拟合得到布里渊中心频移,根据如下公式可以进行温度或应变的解调:

$$\Delta \nu_B = C_B^e \Delta \varepsilon + C_B^T \Delta T \quad (1)$$

其中: $\Delta \nu_B$ 为光纤布里渊频移的改变量, C_B^e 为光纤应变系数, C_B^T 为光纤温度系数, $\Delta \varepsilon$ 为光纤的应变, ΔT 为光纤的温变。

在长距离系统中,信噪比是限制布里渊光纤传感距离的主要因素,而简单的提高泵浦光和探测光功率将引起光纤中的非线性效应,不能提高传感距离。其中探测光的功率受限于受激布里渊散射阈值:

$$g_B I_p L = \theta \quad (2)$$

其中: g_B 为布里渊增益系数, I_p 为阈值功率, L 为光纤长度, θ 为阈值参数,近似取值为 21。所以随着传感光纤长度的增加,受激布里渊散射阈值降低,导致传统 BOTDA 系统无法通过提高探测光功率提高信噪比增加传感距离。

泵浦光功率过高将引发克尔效应(自相位调制和交叉相位调制)和光纤色散(群速度色散)等非线性效应。为了分析非线性效应对SBS作用的影响,将自相位调制、交叉相位调制和群速度色散引入到SBS耦合波方程组中^[18],得到:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_p}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} A_p - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + i\gamma(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p - \frac{g_B}{2} A_s Q, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_s}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} A_s - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + i\gamma(|A_s|^2 + 2|A_p|^2)A_s + \frac{g_B}{2} A_p Q^*, \quad (4)$$

$$\Gamma_B \frac{\partial Q}{\partial t} + (1+i\delta)Q = A_p A_s^*, \quad (5)$$

其中: A_p , A_s 和 Q 分别为泵浦光、探测光和声波场的幅值; v_g 是光纤中光速; β_2 是群速度色散参数; γ 是非线性参数; Γ_B 为声子寿命; δ 为失谐参数, 定义为 $\delta = (\omega_p - \omega_s - \Omega_B)\Gamma_B$, ω_p , ω_s 和 Ω_B 分别为泵浦光频率、探测光频率和布里渊频移。长距离 BOTDA 系统中, 泵浦光功率较高(几百毫瓦), 而探测光功率相对较低(几百微瓦), 所以可以忽略探测光的自相位调制和群速度色散, 同时泵浦光和探测光之间的交叉相位调制也可以忽略。则 SBS 耦合波方程可以简化为

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_p}{\partial t} = i\gamma|A_p|^2 A_p - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} - \frac{g_B}{2} A_s Q - \frac{\alpha}{2} A_p, \quad (6)$$

$$-\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_s}{\partial t} = \frac{g_B}{2} A_p Q^* - \frac{\alpha}{2} A_s, \quad (7)$$

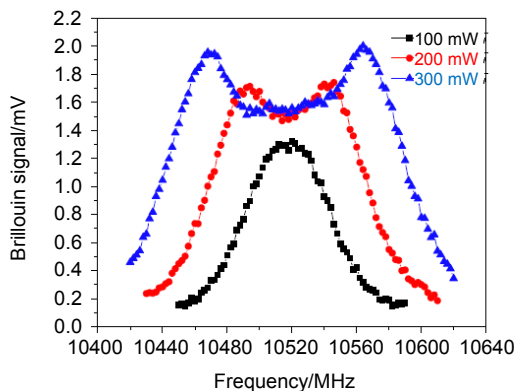


图2 在25 km正常色散光纤中,利用不同功率高斯脉冲光测得的布里渊增益谱^[18]

Fig. 2 Measured Brillouin spectra in the end of the 25 km fibers with a Gaussian pump pulse at different powers for 25 km normal dispersion fiber^[18]

$$\Gamma_B \frac{\partial Q}{\partial t} + (1+i\delta)Q = A_p A_s^*. \quad (8)$$

式(6)右侧四项分别代表自相位调制、群速度色散、布里渊增益和光纤损耗。

自相位调制引起光纤折射率随光强变化,对于泵浦光产生一个附加相位,导致脉冲光频谱展宽。而测得的布里渊增益谱为光纤布里渊本征谱与脉冲频谱卷积的结果,导致测得布里渊增益谱展宽,如图2所示,可以看出随着泵浦功率的提高,展宽变得更加严重。图2为正常色散光纤中的测量结果,反常色散光纤也会得到同样的结果^[18]。

调制不稳定性将导致泵浦脉冲光在载频附近产生对称的边频,在泵浦光传输过程中载频与边频之间能量不断转换^[19]。高功率的方形脉冲在反常色散光纤中易产生调制不稳定性,测得布里渊增益谱三维图如图3所示,会存在某些位置无法测得布里渊增益谱的现象。正常色散光纤对于调制不稳定性有一定的抑制作用。

除此之外, BOTDA 系统在测量过程中扫描泵浦光频率,而在泵浦光与探测光不同频率差时,泵浦光向探测光转移的能量不同。当频率差在光纤布里渊频移附近时,泵浦光转移能量较多,到达光纤末端时能量较低;当频率差远离光纤布里渊频移时,泵浦光转移能量较少,到达光纤末端能量较高;这样,在光纤末端测得的布里渊增益谱将在光纤布里渊中心频率附近幅值降低,产生双峰,这就是非局域效应^[20]。非局域效应将影响布里渊增益谱的拟合精度,从而影响传感精度。泵浦光的能量不断转移也将发生泵浦抽空现象^[21]。利用布里渊衰减谱(探测光将能量转移到泵浦脉

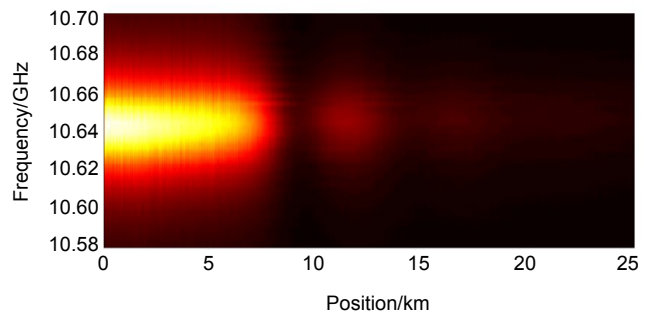


图3 在25 km反常色散光纤中,利用700 mW方形脉冲光测得的布里渊三维增益谱^[18]

Fig. 3 Measured three-dimensional Brillouin spectra with a square pump pulse at a power of 700 mW in 25 km anomalous dispersion fiber^[18]

冲光)可以有效避免泵浦抽空现象^[22],但是仍不能避免非局域效应。

经过上述分析,长距离分布式布里渊光时域分析系统的主要限制因素为信噪比、受激布里渊散射阈值、自相位调制、调制不稳定性、泵浦抽空和非局域效应。下面将介绍一些关键技术,克服上述限制因素,实现长距离分布式布里渊光纤传感。

3 长距离布里渊光纤传感技术

3.1 基于时分和频分复用的长距离布里渊光纤传感技术研究

随着 BOTDA 系统中 SBS 作用长度的增加,泵浦抽空和非局域效应将变得更加显著,严重影响布里渊频移的测量精度。所以提出利用时分复用技术实现长距离分布式布里渊光纤传感,主要原理为利用时间上的分段作用缓解泵浦抽空和非局域效应。将探测光调制为脉冲信号,使得泵浦光与探测光只在脉冲信号内发生作用,从而降低光纤中 SBS 作用长度,调节泵浦脉冲与探测脉冲的时间延迟,控制 SBS 发生的位置,多次测量实现 100 km 长距离分布式布里渊光纤温度传感^[14]。

将探测光脉冲时间分别设为 500 μs 、140 μs 、90 μs 、60 μs 、50 μs 、40 μs 、30 μs 、30 μs 、20 μs 、20 μs 、20 μs ,如表 1 所示,按照探测光传输方向进行标号,不同长度的分段主要目的是控制 SBS 增益,防止泵浦抽空和非局域效应的发生。由于泵浦光的传输损耗导致泵浦光功率降低,所以前几段 SBS 作用强度较弱,则作用长度可以设定较大,甚至第 1 段光纤长度达到 50 km。

严格调节泵浦脉冲光与探测脉冲光之间的延迟时间,保证每组测量位置完整的拼接,11 次测量完成 100

km 传感光纤布里渊频移的测量。11 段传感光纤布里渊信号时域波形如图 4 所示,泵浦光与探测光的频率差分别为:(a) 10.535 GHz,(b)~(c) 10.580 GHz,(d)~(k) 10.530 GHz。采用脉冲差分技术,提高系统的空间分辨率,实验中利用 120 ns/100 ns 泵浦脉冲得到 2 m 的空间分辨率,如图 5(a)所示。100 km 末端受热光纤的布里渊增益谱如图 5(b)所示,布里渊频移误差为 ± 2 MHz,相应的温度误差为 ± 2 $^{\circ}\text{C}$ 。

上述布里渊时分复用技术利用探测光的脉冲调制减少 SBS 作用长度,同样可采用多种不同布里渊频移的光纤,由于不同光纤之间布里渊频移差大于布里渊增益谱线宽,保证探测光频率扫描的过程中,SBS 作用只发生在同一布里渊中心频移的光纤内,从而降低 SBS 作用长度,这种方法称为布里渊频分复用技术^[9]。实验中光纤排列方式如图 6 所示,在 1、2、4 和 5 的位置放置 MetroCor 光纤,其余为 LEAF 光纤,并且同种光纤之间也有一定的布里渊频移差。在 75 km 的位置放置两台掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifiers, EDFA),补偿 16 dB 的光纤传输损耗。

泵浦光脉冲峰值功率为 400 mW,探测光功率为 0.2 mW,二者之间频率差扫描范围从 10.460 GHz 到 10.700 GHz,扫描步长 5 MHz。在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下,1 到 6 每盘光纤的布里渊频移为 10.518 GHz、10.573 GHz、10.643 GHz、10.540 GHz、10.525 GHz、10.646 GHz。当泵浦光脉冲为 80 ns 时,150 km 光纤三维布里渊增益谱俯视图,如图 7 所示。

同样可以采用 120 ns/100 ns 双脉冲差分技术实现 2 m 空间分辨率 150 km 超长距离分布式布里渊光纤传感。在光纤末端布里渊频移误差大约为 1.5 MHz,相应的温度精度为 1.5 $^{\circ}\text{C}$,应变精度为 30 $\mu\epsilon$ 。

表 1 100 km 传感光纤分段情况^[14]

Table 1 Division of 100 km sensing fiber^[14]

Number of section	Length/km	Brillouin gain	Pump pulse width/ μs
1	50	0.34	500
2	14	0.33	140
3	9	0.35	90
4	6	0.33	60
5	5	0.36	50
6	4	0.35	40
7	3	0.31	30
8	3	0.35	30
9	2	0.27	20
10	2	0.29	20
11	2	0.32	20

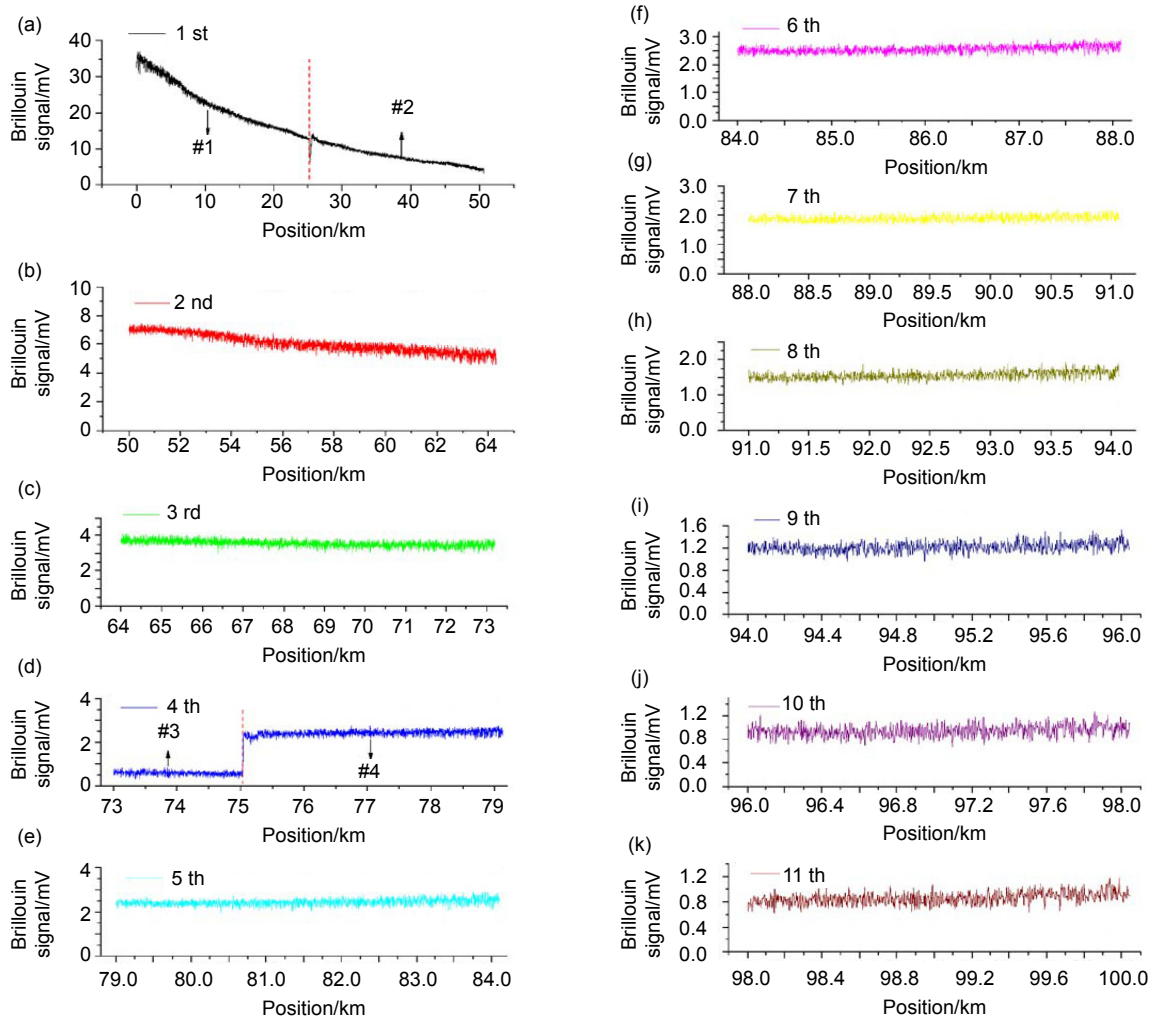


图 4 11 段传感光纤的布里渊信号时域波形。泵浦光与探测光的频率差分别为：(a) 10.535 GHz; (b)~(c) 10.580 GHz; (d)~(k) 10.530 GHz^[14]

Fig. 4 Time traces of the Brillouin signal for 11 sections. The frequency offset between the probe and pump waves is locked at 10.535 MHz for (a), 10.580 MHz for (b)~(c), and 10.530 MHz for (d)~(k)^[14]

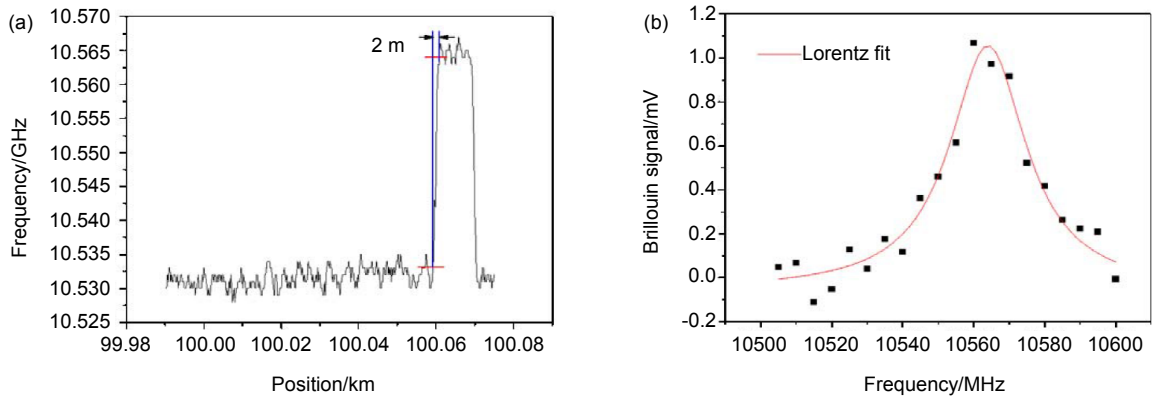


图 5 (a) 100 km 末端布里渊频移; (b) 加热部分传感光纤布里渊增益谱^[14]

Fig. 5 (a) Measured BFS in the far end of the 100 km sensing fiber; (b) A typical spectrum of the heated fiber near the end of 100 km^[14]

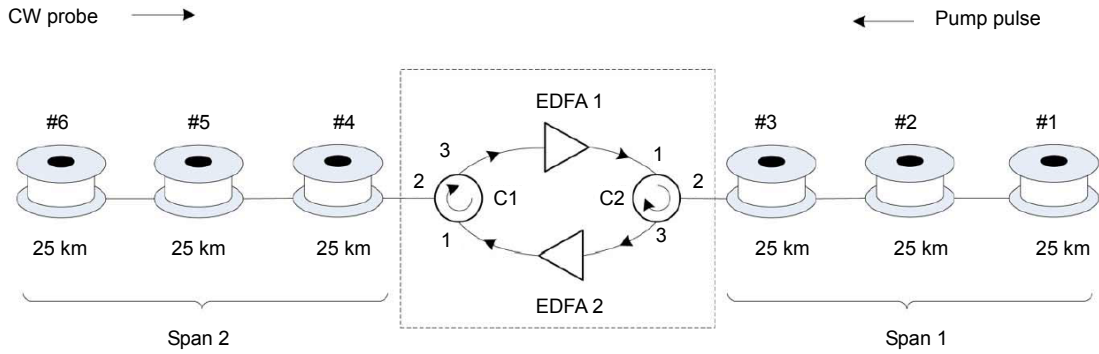


图 6 频分复用 150 km 光纤排列示意图^[9]
Fig. 6 Layout of the sensing fibers and in-line EDFAs^[9]

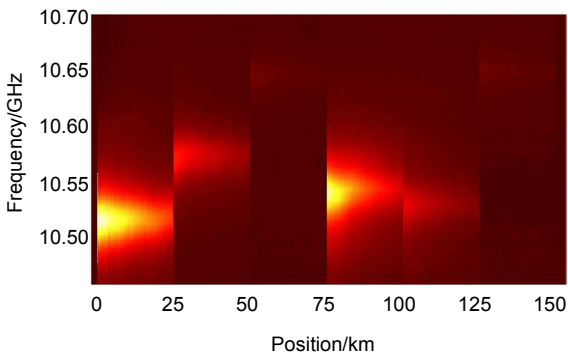


图 7 150 km 光纤三维布里渊增益谱俯视图^[9]
Fig. 7 Top view of the measured three-dimensional Brillouin spectra over 150 km sensing fibers^[9]

这一小节总结了之前我们在长距离布里渊光纤传感中的主要工作。利用时分或频分复用技术，降低 SBS 作用长度，避免泵浦抽空和非局域效应。然而时分复用需要多次测量，频分复用需要增加扫描频率范围，两种技术都增加了 BOTDA 系统的测量时间。综上所述，时分或频分复用 BOTDA 系统通过牺牲测量时间，能够实现高空间分辨率、高精度和长距离分布式布里渊光纤传感。

3.2 基于脉冲编码的长距离布里渊光纤传感技术研究

长距离传感中，直接提高泵浦光功率的方法对信噪比的提高是有限的，因为其功率受到自相位调制和调制不稳定性等非线性效应的限制。使用脉冲编码技术，可以在不提高泵浦光功率的前提下，有效提高布里渊时域信号的信噪比，数据解调后得到编码序列中每一个脉冲的布里渊时域信号，BOTDA 系统的空间分辨率由码宽决定，并且可以降低采集过程中的平均次数。

脉冲编码技术主要原理为：将泵浦脉冲光调制为光脉冲编码序列输入到待测光纤中，假设每一脉冲光的布里渊散射信号为线性叠加的结果，利用编码矩阵的逆矩阵解调出单一脉冲的布里渊时域波形。所以在 BOTDA 系统测量中归零码是一种更好的选择，0 码所占的时间远大于声子寿命(10 ns)，之后的脉冲测量信号不会受到上一个脉冲的影响。这里主要介绍归零码的脉冲编码技术，首先给出编码矩阵 M ，以 7 阶 Simplex 矩阵为例：

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将泵浦光按照矩阵的每一行进行编码(1 代表有光，0 代表无光)，变为泵浦脉冲序列注入传感光纤，第 i 行泵浦脉冲序列得到时域传感信号为 $\eta_i(t)$ 。假设 $S_1(t)$ 为单脉冲光 $P_1(t)$ 经过 BOTDA 系统后的无噪声信号， $S_i(t) = S_1(t - (i-1)\tau)$ 为单脉冲光 $P_i(t) = P_1(t - (i-1)\tau)$ 经过 BOTDA 系统后的无噪声信号，其中 τ 为每个码的长度。可以得到如下数学表达式：

$$\begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \vdots \\ \eta_i(t) \\ \vdots \\ \eta_N(t) \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} S_1(t) \\ \vdots \\ S_i(t) \\ \vdots \\ S_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ \vdots \\ e_i(t) \\ \vdots \\ e_N(t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中： N 为编码数， $e_i(t)$ 为噪声信号。 $\eta_i(t)$ 为已知的测量结果，因此包含噪声的单脉冲信号可以通过下式

解调：

$$\begin{bmatrix} S'_1(t) \\ \vdots \\ S'_i(t) \\ \vdots \\ S'_N(t) \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \vdots \\ \eta_i(t) \\ \vdots \\ \eta_N(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将解调得到的信号 $S'_i(t)$ 进行延时平均, 即可得到信噪比提高的单脉冲 BOTDA 信号, 空间分辨率仍与单脉冲一致, 信噪比比相同次数的简单平均去噪方法提高了 $(N+1)/(2\sqrt{N})$ 倍。

2010 年, Soto 利用 511 位 Simplex 编码进行了长距离传感实验。在 50 km 传感光纤上实现了 1 m 空间分辨率和大约 2.2 MHz 的测量不确定度^[11]。通过实验观察到使用 511 位脉冲编码方法相比传统单脉冲平均去噪方法, 信噪比可以提高大约 10.3 dB。泵浦探测光频差在光纤布里渊频移(10.986 GHz)时, BOTDA 时域信号如图 8 所示, 脉冲编码方法信噪比有显著提高。

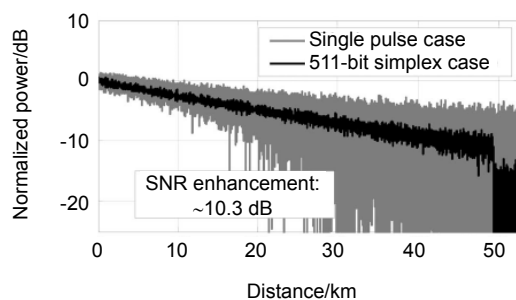


图 8 频率差在 10.986 GHz 的 BOTDA 时域信号, 黑色为 511 位编码方法, 灰色为单脉冲方法^[11]
Fig. 8 BOTDA traces at 10.986 GHz for both simplex coding (black line) and single-pulse (gray line) cases^[11]

同样还有格雷码和循环编码等其它编码技术, 这些编码技术同样提高 BOTDA 系统信噪比。本节介绍的脉冲编码技术可以提高 BOTDA 系统信噪比, 有效避免脉冲光发生非线性效应, 实现长距离分布式布里渊光纤传感, 但是脉冲编码技术对每一组编码序列进行一次频率扫描, 需要付出额外的时间完成测量。

3.3 基于宽带频率调制的长距离布里渊光纤传感技术研究

在 BOTDA 系统中, 为实现分布式测量, 泵浦光采用脉冲调制, 则泵浦光的频谱为 sinc 函数。在 SBS 相互作用的过程中, 只有布里渊增益谱线宽内的频率被消耗或放大, 时域上泵浦光脉冲波形就会发生变形, 随着距离的增加, 脉冲变形更加明显, 最终导致远端

布里渊增益谱变形, 影响测量精度。下面介绍两种宽带探测光的长距离分布式布里渊光纤传感方案, 可以有效地解决这个问题。

基于探测光频率周期性线性调制的传感技术, 其原理图如图 9 所示, 泵浦脉冲光固定频率不变, 探测光随时间进行周期性的频率调制, 探测光中心频率与泵浦光频率差设定为传感光纤的布里渊频移, 并且对探测光的频率调制与脉冲光调制进行同步, 而通过改变泵浦光与探测光之间的时延即可实现每个位置的频率扫描。宽带调制的探测光有两个明显的好处, 探测光的受激布里渊散射阈值提高, 能够输入更高的探测光功率, 提高信噪比; 泵浦脉冲光的频谱得到均匀放大, 避免非局域效应。

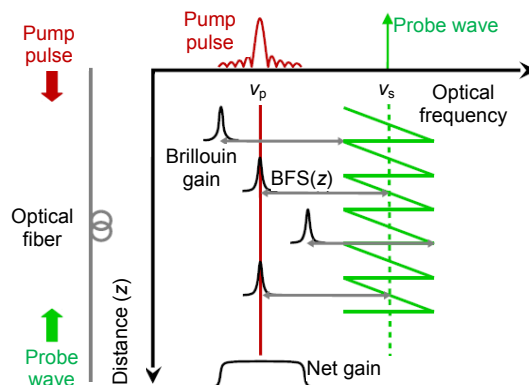


图 9 探测光频率周期调制技术原理^[15]
Fig. 9 Fundamentals of probe frequency modulation technology^[15]

2016 年, Mompó 等人^[15]采用这种探测光周期性线性频率调制的 BOTDA 系统, 在 100 km 传感距离下, 注入功率高达 9 dBm 的探测光, 成功实现了 1 m 的空间分辨率和 1 MHz 的测量不确定度。采用损耗谱装置得到的 100 km 三维布里渊损耗谱如图 10 所示。这种探测光频率调制方案提高了长距离布里渊传感的探测光输入功率, 增强信噪比, 是长距离传感的一大技术突破。

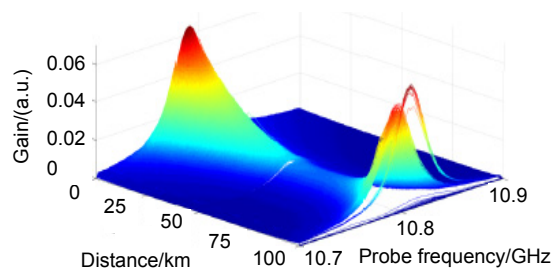


图 10 100 km 光纤三维布里渊损耗谱^[15]
Fig. 10 Brillouin loss spectra distribution over 100 km fibers^[15]

另一种为基于光学频率梳的传感方案, 泵浦光仍然选择单频脉冲光, 探测光为频率梳连续光, 泵浦光与探测光中心频率差调整为光纤布里渊频移。探测光与泵浦光作用时, 频率梳的每个频率受到的增益不同, 通过将相干探测得到的探测光信号进行频谱分析, 即可得知光纤的布里渊谱。采用光学频率梳的宽带频率调制方法, 同样可以提高受激布里渊散射阈值和避免非局域效应。但在基于光学频率梳的长距离传感方案中, 其频率测量精度与空间分辨率之间存在矛盾, 减小频率梳的频率间隔可以提高测量精度, 然而对探测信号进行傅里叶变换求频谱时需要截取更长的时间区间, 从而降低系统空间分辨率。

2017 年, Jia 等人^[23]采用频率梳方案进行长距离传感实验, 采用的频率梳间隔为 20 MHz, 但其为提高频率测量精度, 又进行 4 次扫频最终实现 5 MHz 的频率间隔。用于相干探测的本振光与频率梳信号一同在光纤中传播, 降低相干探测对激光器线宽的要求。传感系统又结合损耗谱结构和脉冲编码技术, 在 74.2 km 的传感光纤中, 实现了 6 m 的空间分辨率和 ±0.7 °C 的温度测量不确定度。

本小节主要讲述了基于宽带频率调制的长距离 BOTDA 传感技术, 目前主要分为探测光频率周期性线性调制和光学频率梳两种方案, 二者都可以有效提高探测光功率, 提高信号信噪比。另外频率梳方案难以进一步提高空间分辨率, 但能够实现快速采集, 将布里渊增益谱的分析在线下进行。

3.4 基于图像处理算法的长距离布里渊光纤传感技术研究

布里渊光时域分析系统的测量过程中, 扫描泵浦光与探测光的频率差, 记录每一频率差的 BOTDA 信号, 得到一个二维矩阵。每一行是位置信息, 每一列是某一位置的布里渊增益谱, 空间坐标系中表示为三维布里渊增益谱。2015 年 Soto 和 Luc 提出利用图像处理的方法对得到的布里渊信号进行降噪处理^[16], 实现长距离布里渊光纤传感。将测量得到的二维矩阵看作一张灰度图像, 而矩阵中的元素相当于灰度值, 图像降噪处理的最小单元看作像素点, 利用现有的图像处理方法进行降噪处理, 可以大幅增加信噪比, 从而在增加传感距离、提高空间分辨率和减少测量时间等方面增强布里渊光纤传感器的性能。

非局域平均算法对于 BOTDA 系统数据的降噪处理是一种较为理想的算法。其算法的核心是利用图像

中的冗余信息进行降噪处理, 同时能最大程度地保持图像细节特征, 而布里渊传感数据正是每个位置布里渊增益谱的不断重复。非局域平均算法(non-local means, NLM)是将像素点附近的数据加权平均的处理过程:

$$NLM \{f(i)\} = \sum_{j \in I} w(i, j) \cdot f(j), \quad (8)$$

其中: I 为选取的计算域, $f(j)$ 为像素 j 位置处的像素值, $w(i, j)$ 为权重因子。

合理地选择计算参数, 非局域平均图像处理能够将布里渊传感数据的信噪比至少提高 10 dB。另外还有频域图像滤波, 如二维离散小波变换和余弦变换。二维小波变换图像处理对于 BOTDA 数据降噪也是非常有效的, 其降噪过程通常分为三步: 首先利用离散小波变换对 BOTDA 数据进行分解, 其次利用非线性阈值函数对小波系数进行处理, 最后进行小波逆变换, 恢复出降噪后的 BOTDA 数据。

2016 年 Soto 利用非局域平均图像算法, 对传统的 BOTDA 系统测量数据进行降噪处理^[17]。在 200 km 的光纤回路中, 实现 2 m 空间分辨率 100 km 传感距离的分布式布里渊光纤传感实验。得到的 100 km 布里渊中心频移的拟合结果如图 11 所示。可以看到在光纤末端, 图像降噪处理后的拟合结果信噪比明显好于未处理的拟合结果。进一步分析在 100 km 附近图像处理前后的布里渊增益谱, 如图 12 所示, 显示出图像处理在 BOTDA 数据降噪方面的超强能力, 在信噪比较低的情况下, 仍能够将布里渊增益谱恢复出来。

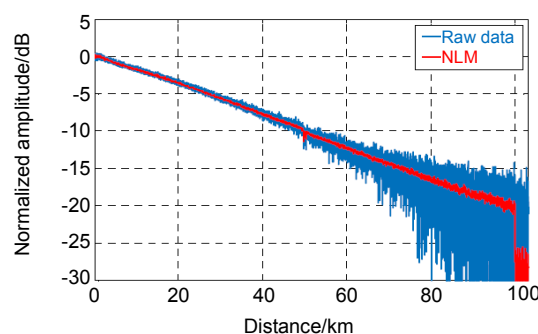


图 11 图像处理前后峰值布里渊增益处布里渊信号^[17]
Fig. 11 BOTDA trace at the peak Brillouin gain frequency obtained from the raw (blue lines) and denoised (red lines) data^[17]

综上所述, 图像处理算法在 BOTDA 数据降噪的有效性已经得到实验验证, 尤其是非线性图像处理算法, 不仅拥有极强的数据降噪能力, 而且可以保留数

据的细节信息,不会影响 BOTDA 系统的空间分辨率。图像处理的降噪算法极大简化了目前长距离布里渊光纤传感系统的实验装置和硬件要求。

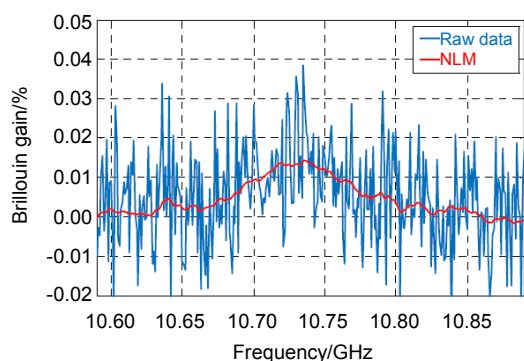


图 12 图像处理前后,在 100 km 附近得到的布里渊增益谱^[17]

Fig. 12 Brillouin gain spectrum measured near 100 km distance, obtained from the raw and denoised data^[17]

4 结论和展望

本文首先理论上分析了长距离分布式布里渊光纤传感的限制因素,接着总结回顾了长距离分布式布里渊光纤传感的关键技术——时分复用和频分复用技术降低 SBS 作用长度、脉冲编码有效提高信噪比、宽带频率调制避免非局域效应和图像处理算法去噪,这些技术帮助克服长距离布里渊光纤传感的诸多限制条件。日益增长的实际工程需求促进着长距离布里渊光纤传感的不断发展。布里渊光纤传感的传感距离已经达到百公里量级,随着技术的不断成熟,其空间分辨率、传感精度和测量时间这些参数都将不断优化,其在边境安全、长距离管道监测和大型建筑健康监测等诸多领域将发挥重要的作用。

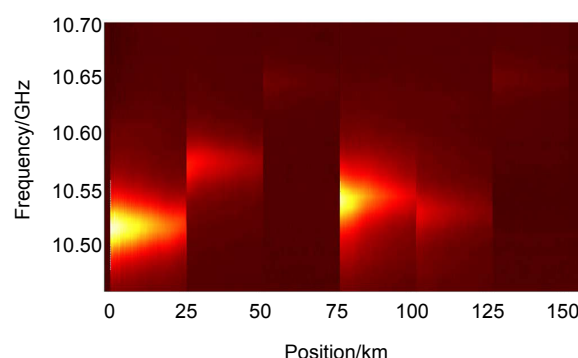
参考文献

- [1] Sun Q, Feng H, Yan X Y, *et al.* Recognition of a phase-sensitivity OTDR sensing system based on morphologic feature extraction[J]. *Sensors*, 2015, **15**(7): 15179–15197.
- [2] Dong Y K, Chen X, Liu E H, *et al.* Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(28): 7810–7815.
- [3] Dong Y K, Xu P B, Fu C, *et al.* 1200°C high-temperature distributed Brillouin optical fiber sensing based on photonics crystal fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9634**: 963485.
- [4] Kim Y H, Song K Y. Tailored pump compensation for Brillouin optical time-domain analysis with distributed Brillouin amplification[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(13): 14098–14105.
- [5] Bolognini G, Hartog A H. Raman-based fibre sensors: trends and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 678–688.
- [6] Dominguez-Lopez A, Soto M A, Martin-Lopez S, *et al.* Resolving 1 million sensing points in an optimized differential time-domain Brillouin sensor[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(10): 1903–1906.
- [7] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, **1**(5): 107–108.
- [8] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(15): 2219–2222.
- [9] 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.
- [10] Ba D X, Wang B Z, Zhou D W, *et al.* Dynamic distributed Brillouin optical fiber sensing based on multi-slope analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9634**: 96344T.
- [11] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D, *et al.* Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(2): 259–261.
- [12] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification[J]. *Optical Letters*, 2011, **36**(2): 232–234.
- [13] 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 Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(20): 1823–1826.
- [14] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100km sensing length[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(2): 277–279.
- [15] Mompó J J, Urricelqui J, Loayssa A. Brillouin optical time-domain analysis sensor with pump pulse amplification[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 12672–12681.
- [16] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 10870.
- [17] Soto M A, Ramírez J, Thevenaz L. 200 km fiber-loop conventional Brillouin distributed sensor with 2 m spatial resolution using image denoising[C]//*Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2016: Th3A.4.
- [18] Dong Y K, Zhang H Y, Lu Z W, *et al.* Impacts of Kerr effect and fiber dispersion on long-range Brillouin optical time-domain analysis systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8421**: 84219Z.
- [19] Tai K, Hasegawa A, Tomita A. Observation of modulational instability in optical fibers[J]. *Physical Review Letters*, 1986, **56**(2): 135.
- [20] Dominguez-Lopez A, Angulo-Vinuesa X, Lopez-Gil A, *et al.* Non-local effects in dual-probe-sideband Brillouin optical time domain analysis[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(8): 10341–10352.
- [21] Thévenaz L, Mafang S F, Lin Jie. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(12): 14017–14035.
- [22] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. System optimization of a long-range Brillouin-loss-based distributed fiber sensor[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(27): 5020–5025.
- [23] Jia X H, Chang H Q, Lin K, *et al.* Frequency-comb-based BOTDA sensors for high-spatial-resolution/long-distance sensing[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(6): 6997–7007.

Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing

Wang Benzhang, Pang Chao, Zhou Dengwang, Dong Yongkang*

National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China



Top view of the measured three-dimensional Brillouin spectra over 150 km sensing fibers based on frequency division multiplexing technology

Overview: The distributed Brillouin optical fiber sensors have gained considerable interests, due to their capabilities of monitoring strain and temperature. The Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system, which is the typical representation of distributed Brillouin sensors, features high spatial resolution, long range and fast measurement. In recent years, the BOTDA sensors have been widely used in oil and gas pipelines to detect the leakage, civil structure health monitoring and cable temperature sensing. The distributed BOTDA sensors are promising tools to these and other applications that need for monitoring large distances.

However, the sensing range of BOTDA sensors is fundamentally determined by the signal to noise ratio (SNR). The continuous probe power is limited by the Brillouin threshold, while the modulation instability (MI) or the self-phase modulation (SPM) is the main obstacle to input high power pump pulse. We have systematically investigated the impact of MI and SPM on long-range BOTDA system theoretically and experimentally. Besides, the pump depletion and non-local effect is detrimental to the long-range BOTDA sensors performance.

Several impressive technologies have been proposed to extend the sensing range of BOTDA system. In 2010, the coding BOTDA is firstly proposed to increase the SNR effectively by Soto et al. Then they utilize the pre-amplification and Raman amplification to further extend the sensing range to 120 km with an accuracy of $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $44\text{ }\mu\text{e}$ in 2012. In 2011, Dong et al proposed the time division BOTDA to decrease the SBS interaction range and realized a 100 km Brillouin fiber sensing. In the same vein, the frequency division combining the in-line EDFAs BOTDA achieved a 150 km sensing range with a 2 m spatial resolution. In 2016, the Spanish group demonstrated a BOTDA sensor in loss configuration with the optical frequency of the probe wave modulating along the fiber. It had several advantages such as high Brillouin threshold, overcoming the non-local effect and no additional amplifier. In the same year, the Swiss team firstly utilized the image denoising and it was able to enhance the SNR 14 dB in 50 km fiber. Imaging denoising was an effective method to increase the SNR in BOTDA system with no hardware modification.

In summary, long range Brillouin sensing schemes based on time division multiplexing, frequency division multiplexing, pulse coding, wide-bandwidth frequency modulation and image denoising are introduced in this paper. With long range Brillouin sensors applied in practice, increasing demand for fast measurement emerges, which we believe will be dominant in the research of long range Brillouin fiber sensing in the future.

Citation: Wang B Z, Pang C, Zhou D W, et al. Advances of key technologies in long-range distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(9): 170484

Supported by National Natural Science Fund of China (61575052) and National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects, China (2017YFF0108700)

* E-mail: aldendong@163.com