

基于布里渊光时域分析的动态测量技术研究进展

尚秋峰^{**}, 胡雨婷^{*}

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 布里渊光时域分析(BOTDA)技术是基于光时域反射(OTDR)和受激布里渊散射(SBS)效应的一种重要的分布式光纤传感技术。由于具有多参量传感、精度高、距离长等优势,该技术特别适用于大型基础设施、石油化工、电力通信网络和海底光缆等长距离、大范围的高危领域的故障定位和健康监测。但传统 BOTDA 只能用于静态测量,其应用场合和发展前景受限。综述了目前基于 BOTDA 的各项动态测量技术,详细介绍了其测量原理,讨论了影响其传感速度的基本因素和研究难点,并展望了未来 BOTDA 技术的发展前景。

关键词 光纤光学; 布里渊光时域分析; 分布式光纤传感; 受激布里渊散射; 动态测量

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100004

Research Progress of Dynamic Measurement Technology Based on Brillouin Optical Time-Domain Analysis

Shang Qiufeng^{**}, Hu Yuting^{*}

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

Abstract Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) is an important distributed optical fiber sensing technology based on optical time domain reflectometry (OTDR) and stimulated Brillouin scattering (SBS) effect. It has many advantages such as multi-parameter sensing, high accuracy, and long sensing distance. Accordingly, it is especially suitable for fault location and health monitoring in high-risk fields such as large infrastructure, petrochemical industry, power communication network and undersea optical fiber cable. The traditional BOTDA is only capable of static measurement, which seriously restricts its application scenarios and development prospects. The dynamic measurement techniques using BOTDA are summarized and the measurement principles are also introduced in detail. The basic factors and research difficulties which affect its sensing speed are discussed, and the future development prospect is forecasted.

Key words fiber optics; Brillouin optical time-domain analysis; distributed optical fiber sensing; stimulated Brillouin scattering; dynamic measurement

OCIS codes 000.2190; 060.2310; 060.2370; 060.4370

1 引言

21 世纪以来,基于受激布里渊散射(SBS)的布里渊光时域分析(BOTDA)技术在大型基础设施、电力通信网络、油气管道等领域的健康监测及故障定位、预警方面展现了巨大的应用前景^[1-3]。

BOTDA 技术利用光纤中布里渊频移变化量与

光纤所受温度和应变成线性关系的特性,实现了温度和应变的连续分布式传感。与基于瑞利散射或拉曼散射的光纤传感技术不同,BOTDA 可进行多参量传感,且具有接收信号强度大、传感距离长、空间分辨率高、测量精度高等特点,近年来吸引了大量的研究和关注^[4-5]。由于传统的 BOTDA 技术以扫频的方式获得布里渊散射谱,一次完整测量的时间花费至少在 min 量级,因而往往局限于静态测量领域。为了

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-12; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(61775057)、河北省自然科学基金(F2014502098)

* E-mail: 18330215180@163.com; ** E-mail: 1170916946@qq.com

增进 BOTDA 技术在动态测量领域的应用,学者们相继提出了包括单斜坡法、双斜坡法、多斜坡法、布里渊相位增益比 (BPGR) 斜坡法等斜坡辅助 BOTDA (SA-BOTDA) 技术,包括多波长探测技术、光学频率梳技术等的免扫频 BOTDA (SF-BOTDA) 技术,以及基于任意波形发生器的捷变频快速 BOTDA 技术和抑制偏振相关的正交 BOTDA 技术。这些技术优化了 BOTDA 的传感速度和动态测量范围,提高了 BOTDA 解决实际工程应用问题的能力。

2 基本原理

2.1 BOTDA 传感原理

BOTDA 系统具有双端接入结构,如图 1 所示,

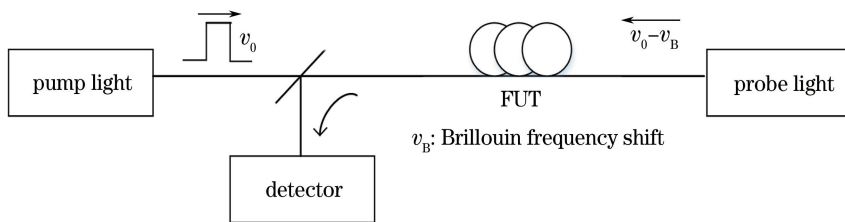


图 1 BOTDA 的基本结构图

Fig. 1 Basic structure diagram of BOTDA

2.2 影响 BOTDA 实时性的主要因素

由于布里渊散射谱宽度与抽运脉冲宽度成反比,抽运脉冲越宽,布里渊散射谱越接近洛伦兹线型^[7]。为了提高 BOTDA 系统的空间分辨率,在实际应用中,通常需要减小抽运脉冲宽度,这会引入布里渊散射谱展宽,间接导致扫频范围加大,测量时间延长。另一方面,为了提高探测精度,通常需要减小扫频间隔,并加大平均次数以提高信噪比。所以,BOTDA 系统的空间分辨率和测量精度要求越高,所需的测量时间越长,实时性越差。

影响 BOTDA 系统传感速度的因素主要有 4 个:抽运脉冲周期、平均次数、扫频间隔和光频率切换时间。其中,抽运脉冲周期与传感光纤长度有关,为了避免信号重叠,一般不超过 $T_{\text{round-trip}} = 2L/V_g$, L 为光纤长度, V_g 为光纤中光的传播群速度。为了从噪声中恢复出布里渊散射信号,需要在各个扫描频率点处进行多次测量叠加平均来提高 BOTDA 系统的信噪比,平均次数主要依赖于系统设计和传感光纤中的非本地效应。而对于长距离传感,抽运脉冲周期和平均次数是影响传感速度的主要因素,所需的测量时间至少在分钟量级。对于 1 km 以内的短距离传感,微波源的光频率切换时间是影响传感速度的主要因素。

在传感光纤两端分别注入抽运脉冲光和连续探测光,两光在光纤中发生作用,产生受激布里渊散射导致能量转移,以此实现传感。当抽运脉冲光和连续探测光之间的频差等于光纤布里渊频移 (BFS) 时, SBS 作用产生的能量转移最大^[6]。在实际测量中,通常利用微波信号源产生的射频信号和偏置电压端口输入的直流偏置电压来控制电光调制器 (EOM) 的各阶光强,从而产生移频探测光信号。按照一定的频率间隔步进改变脉冲光和探测光之间的频差,这个过程称为扫频,再组合时域波形得到三维布里渊散射谱,最后利用洛伦兹拟合沿光纤各点的频域离散数据点得到沿光纤的 BFS,再将其转化为相应的温度或应变,这就是整个 BOTDA 的传感过程。

3 动态 BOTDA 技术

3.1 SA-BOTDA

3.1.1 单斜坡法

2009 年, Bernini 等^[8]首次提出布里渊增益谱斜坡法,如图 2 所示,该方法的原理是将抽运脉冲光与探测光的频差固定在布里渊增益谱 (BGS) 斜坡中心处,当增益谱受应变的影响随时间左右移动时,检测探测光强度随时间的变化来得到固定位置点的应变随时间的变化曲线。该方法能实现应变的动态测量,但其动态范围受限于 BGS 斜坡的线性区域。

2011 年, Peled 等^[9-10]针对沿光纤的任意 BFS 分

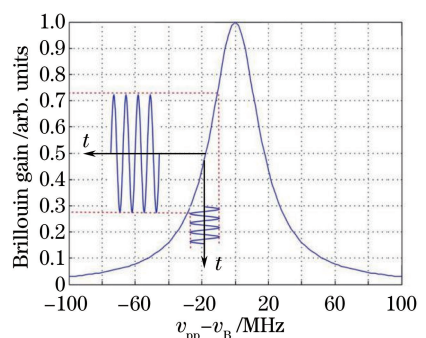


图 2 斜坡法原理图^[8]

Fig. 2 Principle of slope-assisted BOTDA^[8]

布,提出了基于斜坡法的全光纤应变动态测量方案。该方案利用任意波形发生器(AWG)按静态时的BFS分布对探测光进行时域上的频率调制,如图3所示,使单频率的抽运脉冲光与探测光的频差固定在静态BGS的斜坡3 dB等高线处。当应变变化时,BGS发生移动,相应位置处的布里渊增益不再保持于等高线,将随BFS的变化而线性改变。该方法能够实现应变的分布式动态测量,但为了保证应变与布里渊增益的线性转化,应变的动态范围需要约束在斜坡的线性区域。利用布里渊散射谱宽度与抽运脉冲宽度成反比的原理,通过短脉冲的抽运光使布里渊增益谱加宽,可以适当增加动态测量范围。另外,斜坡法对布里渊散射谱的变化极为敏感,当受到调制晶体电压漂移影响时,抽运光功率的变化会转化为温度/应变的误解调,产生测量误差。

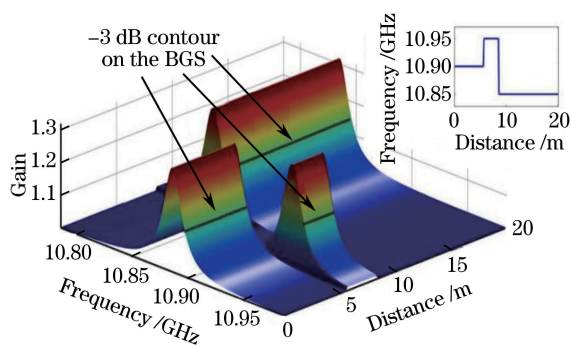


图3 按静态BFS分布进行探测光频率调制示意图^[10]

Fig. 3 Diagram of frequency modulation of probe light based on static BFS distribution^[10]

3.1.2 双斜坡法

2014年, Motil等^[11]提出了双斜坡辅助BOTDA,利用AWG使探测光频率在 $\nu^+(z)$ 和

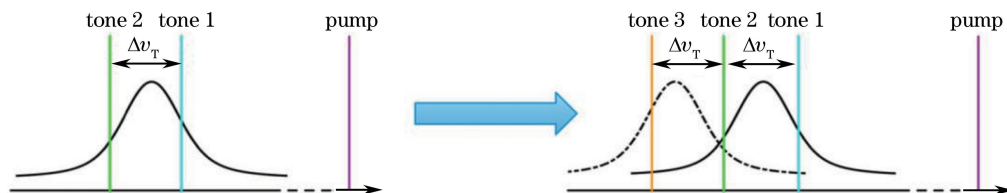


图4 双斜坡法与多斜坡法的对比示意图^[12]

Fig. 4 Contrastive diagram of double-slope method and multi-slope method^[12]

多斜坡法的工作原理如图5所示,通过AWG与二阶边带调制生成含多个频率的探测光,在一个脉冲周期 ΔT 内,抽运脉冲光仅与单频率的探测光作用。再根据光纤BFS的范围选取对应的2个频移,利用 R_B 与 $\Delta\nu_T$ 曲线或BGS表达式对BFS进行求解。多斜坡法极大地扩大了测量范围,但随着

$\nu^-(z)$ 中快速切换,这2个探测光频率对应的布里渊增益分别位于静态BGS两侧的斜坡。将探测光功率与无抽运放大的探测光功率的比值取对数,得到满足洛伦兹线型的布里渊增益谱,(1)式和(2)式将布里渊增益重新定义为

$$G_B(z, \nu, \nu_B(z), P(z)) = K \cdot P(z) \cdot S([\nu - \nu_B(z)]/\Delta\nu_B), \quad (1)$$

$$R_B(\delta\nu_B, z, \nu^+, \nu^-) = \frac{S([\nu^+(z) - \nu_{B0}(z) - \delta\nu_B(t, z)]/\Delta\nu_B)}{S([\nu^-(z) - \nu_{B0}(z) - \delta\nu_B(t, z)]/\Delta\nu_B)}, \quad (2)$$

式中: z 为光纤某位置; ν 为探测光频率; $\nu_B(z)$ 为 z 处的BFS; $P(z)$ 为抽运光功率; $S(\nu)$ 为归一化BGS; $\Delta\nu_B$ 为BGS的半峰全宽; K 为比例系数; $\delta\nu_B$ 为应变对应的BFS的变化范围。双斜坡法通过对光纤连续2个频移对应的布里渊增益求比值后取对数得到 R_B ,消除掉抽运光功率因子 $P(z)$,避免了抽运光功率变化带来的影响。再通过 $\Delta\nu_T = \nu^+ - \nu^-$,求得 R_B 与 $\delta\nu_B$ 的关系曲线,利用其单调线性区间由 R_B 值反推得到沿光纤的BFS,动态测量范围相较于单斜坡法进一步增加,最大约为BGS的半峰全宽。

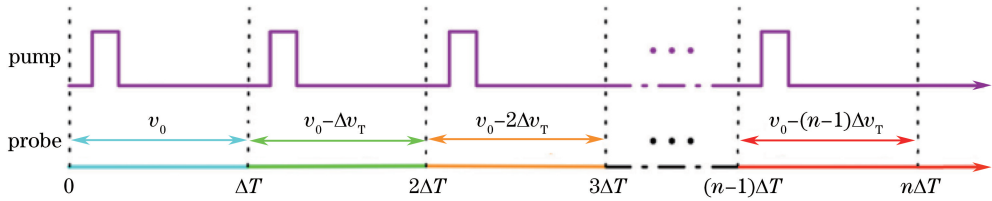
3.1.3 多斜坡法

2016年, Ba等^[12]提出了基于多斜坡辅助的快速BOTDA,进一步扩大了动态测量范围。如图4所示,双斜坡法的测量范围仅为选取的2个探测光频率tone 1和tone 2的频差 $\Delta\nu_T$ 。通过增加AWG输出频率的个数,构造多个BGS斜坡。当BFS的变化较大、超出双斜坡法的测量范围时,可通过tone 2和tone 3 2个相邻的频率点来进行双斜坡解调确定BFS。

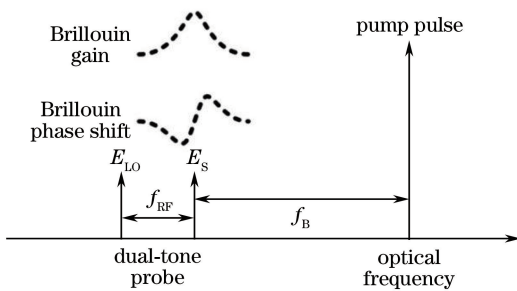
AWG输出探测光频率的个数增加,系统信号采样率会大幅降低。

3.1.4 BPGR斜坡法

2017年,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^[13]提出了BPGR(R_{BPGR})的相关原理, R_{BPGR} 是布里渊相移 P_{SBS} 和布里

图 5 多斜坡法原理图^[12]Fig. 5 Principle diagram of multi-slope method^[12]

渊增益 G_{SBS} 的比值,具有全局线性斜坡且与抽运光功率无关。该技术采用矢量 BOTDA 系统来同时测量布里渊相移谱和增益谱,其原理如图 6 所示,在光纤一端引入同向传输的本振光 E_{LO} 和斯托克斯光 E_{S} 与抽运脉冲光作用,拍频信号经过高通滤波滤除直流分量后,通过希尔伯特变换和 I/Q 解调得到 P_{SBS} 和 G_{SBS} 。

图 6 矢量 BOTDA 的工作原理^[13]Fig. 6 Operating principle of a vector BOTDA^[13]

R_{BPG} 的计算公式为

$$R_{\text{BPG}} = \frac{P_{\text{SBS}}}{G_{\text{SBS}}} = -\frac{2\Delta\nu}{\Delta\nu_{\text{B}}}, \quad (3)$$

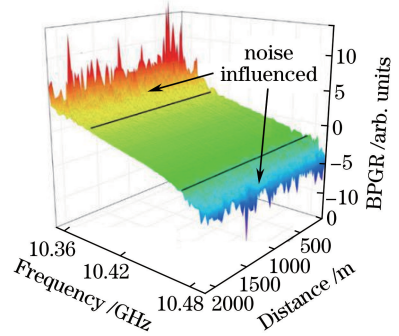
$$\Delta\nu = \nu_{\text{B}} - f_{\Delta}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\nu_{\text{B}}$ 为布里渊线宽; f_{Δ} 为抽运光与探测光的频差; $\Delta\nu$ 为探测光针对布里渊频移 ν_{B} 的失谐量(布里渊中心频移与探测光频移之差)。由于 $\Delta\nu_{\text{B}}$ 事先可测量,故 R_{BPG} 与 $\Delta\nu$ 成线性关系。扫描 $\Delta\nu$, 确定三维 BPG 谱,利用线性拟合便能简单地确定沿光纤的 BFS。图 7 为实验测定的 BPG 三维谱,采用了 25 ns 的抽运脉冲和 40 次的叠加平均,具有全局线性范围,有效验证了 BPG 斜坡法的合理性。

3.2 SF-BOTDA

3.2.1 多波长探测技术

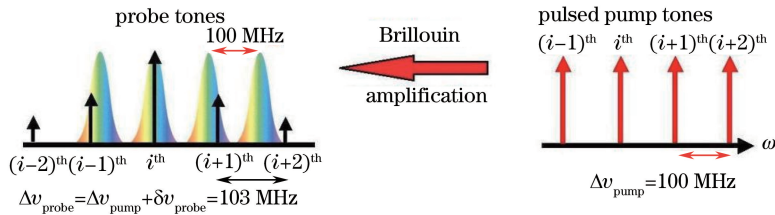
2011 年, Voskoboinik 等^[14-16] 提出多波长 SF-BOTDA 技术,利用成对的不同波长的探测光和抽运脉冲光作用来等效传统 BOTDA 的扫频过程。图 8 为多波长法原理图,在传感光纤两端分别同步注入 N 个波长的探测光和抽运脉冲光,两者频差固定在 BFS 左右。通过 SBS 作用,第 i 个波长的探测

图 7 BPG 的测量结果^[13]Fig. 7 Measured profile of BPG spectrum^[13]

光与抽运脉冲发生能量转移并携带传感信息。通过选取适当的波长间隔 $\Delta\nu_{\text{pump}}$ 和 $\Delta\nu_{\text{probe}}$,可按频谱间隔 $\delta\nu_{\text{probe}} = \Delta\nu_{\text{probe}} - \Delta\nu_{\text{pump}}$ 组建时域波形得到三维布里渊增益谱。

多波长 BOTDA 的测量动态范围为 $N \cdot \delta\nu_{\text{pump}}$,在实际应变测量中,需要 $N \cdot \delta\nu_{\text{pump}}$ 达到 GHz 量级。为了避免 1 个波长的探测光与多个波长的脉冲光作用产生混叠的 BGS,要求 $\Delta\nu_{\text{pump}}$ 必须大于 BGS 底部的谱宽(约 60 MHz),且 $N \cdot \delta\nu_{\text{pump}}$ 不能大于 BFS(约 11 GHz),故而 N 的大小有限。此外, $\delta\nu_{\text{pump}}$ 的增加必然会牺牲 BGS 的谱域粒度,导致温度/应变分辨率降低。因此,2015 年, Voskoboinik 等^[17] 对原方法的动态范围限制进行了进一步分析和讨论,提出采用 3 种抽运波长间隔分别进行 3 次连续测量来确定 BFS 的多波长探测方案,将动态范围提高到 GHz 量级。

2012 年,张旭苹课题组^[18-20] 提出基于多波长探测光的布里渊光纤传感技术,分析验证了多波长布里渊传感系统的可行性,并设计了基于三波长探测光同时检测的损耗型 BOTDA 系统。该系统采用单波长激光外调制^[21] 方法产生三波长光源,通过计算贝塞尔函数在某调制深度的各阶频率分量功率,调节微波源 1 发出的射频信号使电光相位调制器工作在特定的调制深度,满足 0 阶与 ± 1 阶边带的功率相等,其中高阶边带功率很低,可忽略。通过设置波长间隔和连续光的频移,使脉冲光的每个波长的

图 8 多波长法原理图^[16]Fig. 8 Principle diagram of multiple wavelengths method^[16]

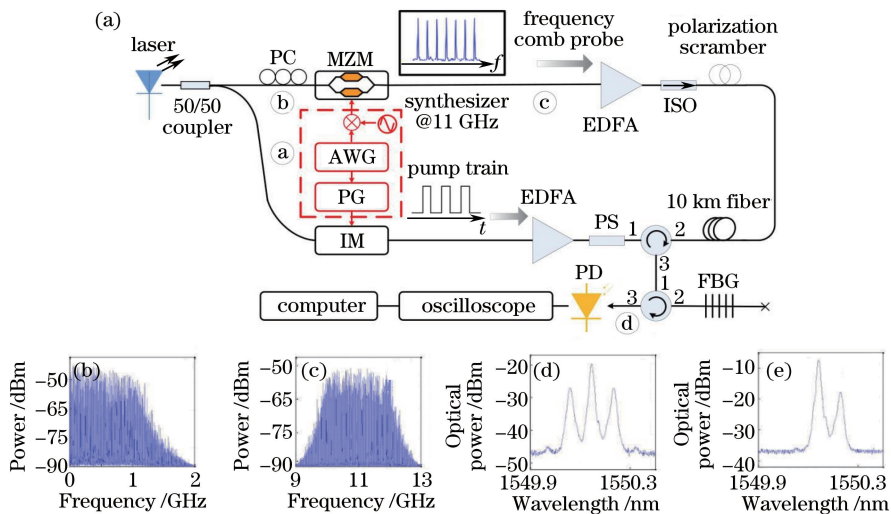
布里渊增益谱内仅有 1 个相应波长的连续光,组成多个能量转移的光波对进行传感。

3.2.2 基于数字光学频率梳的动态 BOTDA

2015 年, Jin 等^[22]提出基于超精细数字光频率梳(DOFC)的 SF-BOTDA。该技术使用数字光频率梳作为探测光,其组成的连续间隔的帧序列相继与抽运脉冲光发生 SBS 作用后产生频率选择性布里渊放大,经过光电探测器后由数字电频率梳(DEFC)解调出 BGS。

DEFC 的产生和解调如图 9 所示,利用双通道 AWG 使光纤两端注入同步,激光器发出的光经过分光耦合后,下支路通过由脉冲发生器(PG)控制的强度调制器(IM)产生脉冲光,再经过掺铒光纤放大器

(EDFA)和扰偏器(PS)后进入光纤。上支路经过偏振控制器(PC)转化成线偏振光后进入马赫-曾德尔调制器(MZM),脉冲序列由快速离散傅里叶逆变换(IFFT)转化为 DEFC,添加保护间隔(GI)后由 AWG 输出,将基带 DEFC 与 11 GHz 的正弦波混频后达到 BGS 的频率范围,再输入到工作在正交偏置点的 MZM 产生双边带 DOFC,最后通过隔离器(ISO)进入光纤。在接收端,探测光信号经过窄带光纤布拉格光栅(FBG)滤除下边带,将载波与上边带信号拍频后去掉 GI,再进行快速离散傅里叶变换(FFT)解调出 DEFC 序列。由于该系统的空间分辨率由帧宽决定,因此仅在 10 km 光纤上实现了约 51.2 m 的空间分辨率, 1.5 °C 及 43.3 με 的温度/应变分辨率。

图 9 基于 DOFC 的免扫频 BOTDA^[22]。(a)原理图;(b)基带 DEFC 信号;

(c) DEFC 信号经过正弦波混频后覆盖 BGS 频率范围;(d)双边带 DOFC 信号;(e)滤除下边带的探测光信号

Fig. 9 Setup of scanning-free BOTDA based on DOFC^[22]. (a) Schematic diagram; (b) DEFC signal of base band; (c) BGS frequency area of DEFC signal after sinusoidal mixing; (d) DOFC signal of double sideband; (e) detection signal after lower sideband is filtered

3.3 捷变频 BOTDA

为了在短距离应用中减少光频率切换时间,2012 年, Peled 等^[23]提出了纳秒级瞬时光频率切换技术,如图 10 所示,将组合了各个频率点的有限长正弦波写进 AWG 的数据存储器,其中各频率的正

弦波持续时间至少大于光在传感光纤中往返传播 1 次的时间。该设计要求 AWG 具有至少几百 MHz 的带宽以适应动态变化的应变和温度,以及具有足够大的存储容量来容纳所有频率点的波形。

直接用 AWG 来合成所有扫描频率点的波形是

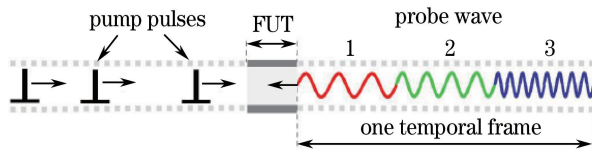


图 10 假设有 3 种探测光频率的捷变频 BOTDA 原理示意图^[23]

Fig. 10 Example of fast sweep BOTDA assembled from three frequencies^[23]

难以实现的,因此 Peled 提出使用双通道的 AWG 和具有 I/Q 输入的微波矢量信号发生器来产生射频调制信号。将微波信号发生器的频率 ν_c 固定在布里渊频移左右,AWG 的 2 个输出通道分别是正弦波和余弦波在各个基带频率点($\nu_c - \nu_i$)的合成信号,其中 ν_i 为各个扫描频率点。通过 I/Q 调制进行频率合成,将 2 个输入通道与频率为 ν_c 的载波混合以产生射频调制信号,并作为电光调制器的输入来调节抽运光和探测光的频差。理想情况下,射频信号能在连续的频率点瞬时切换。但由于切换速度受限于 AWG 的模拟带宽,一般小于 1 ns。该方法不仅可以瞬时切换探测光频率,提高传感速度,还能在此基础上进一步减小扫频间隔,实现全扫频 BGS,达到提高测量精度的目的。

2013 年,董永康课题组^[24-25]提出光学捷变频技术,利用 AWG 与电光调制器二阶边频调制输出光学捷变频信号,通过光纤布拉格光栅滤出光纤布里渊频移附近的下二阶边频作为探测光,实现对光纤布里渊增益谱的快速采集。AWG 同步触发任意函数发生器与采集卡,来保证同一周期内每个抽运脉冲光与每一个频率的探测光在待测光纤中发生受激布里渊散射。

2017 年,Minardo 等^[26]提出结合调频微波源的

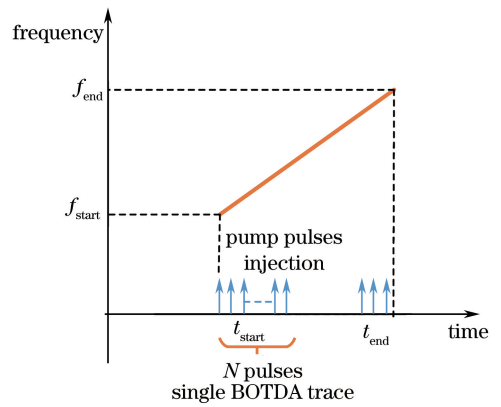


图 11 线性扫频 BOTDA 原理图

快速 BOTDA,通过微波源的频率线性调制来生成与 BGS 采集时间成线性关系的扫频过程。如图 11 所示,先让抽运脉冲与第 1 个线性扫频点的探测光同步注入,在扫频时间间隔内,重复注入脉冲进行多次叠加平均以提高信噪比,因而扫频斜率由扫频步长、脉冲周期、平均次数决定,增加扫频斜率将产生更小的测量时间消耗。该方法实质上相当于减少了光频率切换时间,可实现快速的短距离传感。

此外,2017 年,Kito 等^[27-28]提出采用扫频探测脉冲的快速采集 BOTDA。通过注入电流调谐激光器产生线性扫频速率为 γ_r (单位:Hz/s)的探测脉冲,其与抽运脉冲的频差设置在 BFS 范围内。如图 12 所示,当 2 束光在光纤某点相遇时,在抽运脉冲光经过该点的时间段内,2 束光的频差发生线性变化,满足两者频差为该点的 BFS 时,相关布里渊增益谱(CBG)达到峰值点。当 BFS 发生变化时,使用正交拟合来确定 CBG 峰值的时域平移量 ΔT ,由 $\Delta T = \Delta f_{\text{BFS}} / \gamma_r$ 就可以得到 BFS 的变化量 Δf_{BFS} 。

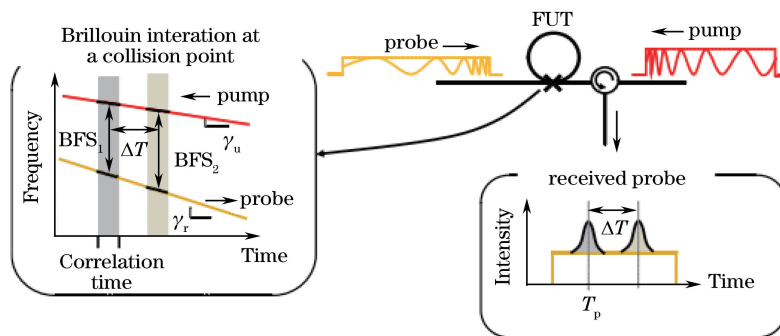


图 12 扫频探测脉冲 BOTDA 原理图^[28]

Fig. 12 Schematic illustration of frequency-swept pulsed BOTDA^[28]

该方案可以简单地根据 CBG 的峰值时域平移来确定 BFS 的变化曲线,达到实时监控的目的。且仅需要简单的激光控制和光电探测系统,不仅减少

了复杂昂贵器件的使用,还进一步提高了传感速度。但缺点在于需要精准地控制抽运脉冲和探测脉冲的时延才能获取固定点的传感参量,且一次测量仅能

得到光纤某一点处的传感参量,从严格意义上讲,并非是全分布式测量。

3.4 抑制偏振相关 BOTDA

不仅光纤的纤芯掺杂和光模的导波特性的影响布里渊增益,另外,由于 SBS 的偏振相关性的影响,探测光和抽运光的偏振态平行度随机变化所引起的偏振起伏和偏振相关衰落还会使沿光纤的布里渊增益呈现高度的不均匀性,从而导致系统极差的信噪比^[29-33]。针对此问题,研究人员提出加大平均次数并使用扰偏器将单侧作用光的偏振态随机化,即在极短时间内高速遍历所有的偏振态,使扰偏光在任何瞬时偏振态的偏振度(DOP)都接近于 1,但从平均时间上看,DOP 接近于 0^[34-35]。这个过程减小了

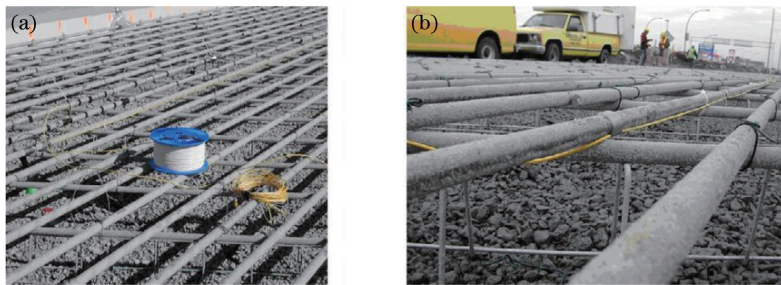


图 13 利用 BOTDA 进行交通冲击波分布式监测。(a)场景 1;(b)场景 2^[38]

Fig. 13 Distributed monitoring of traffic impact wave using BOTDA. (a) Scene 1; (b) scene 2^[38]

2014 年, Urricelqui 等^[39]提出基于双正交脉冲激励的偏振分集技术。在已提出的相位调制探测光和自外差探测技术^[40]的基础上,如图 14 所示,通过调整脉冲光波长,使相互正交的抽运脉冲分别与相位调制探测光的两个调制边带作用产生对称的布里渊增益和损耗。忽略探测光高阶边带的影响,由于

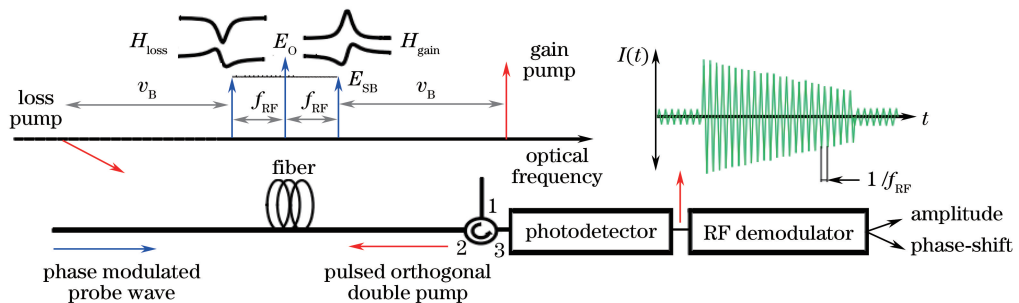


图 14 双正交抽运脉冲与探测光的 SBS 作用和光电检测接收信号图^[39]

Fig. 14 Schematic representation of SBS interaction between the double orthogonal pump and detection light and the received signal^[39]

2014 年, López-Gil 等^[41]提出基于平衡检测和正交双边带探测的 BOTDA 系统,能有效消除偏振噪声。该方案使用保偏密集波分复用(DWDM)滤波器分离出斯托克斯边带和反斯托克斯边带进入两

BGS 的采集速度。除此之外,采用光纤偏振控制器产生正交偏振激励光来抑制 SBS 的偏振相关性也能提高信噪比,进一步减小平均次数,达到提高传感效率的目的,但普通偏振控制器的响应时间一般在 ms 量级,极大地限制了采集速度的优化^[36-37]。

2007 年, Bao 等^[38]提出基于受激布里渊散射偏振相关性的交通混凝土板冲击波的分布式实时监测技术。如图 13 所示,当车辆高速(>100 km/h)通过公路路面时产生的冲击波所形成的局部扰动,会引起本地光纤的双折射率变化,导致局部偏振态改变。由于布里渊增益受偏振因子影响,通过监测 BOTDA 系统斯托克斯光功率的变化就可以实时感知交通冲击波的分布情况。

对称的布里渊作用,近似认为两个边带引起的相移和增益/损耗大小相等。考虑 2 个 1 阶调制边带的偏振态相同,通过理论推导,测量结果呈偏振无关特性。因此,系统可以去掉扰偏器件,提高传感速度。另外,由于检测的射频信号相移与布里渊增益峰值点无关,因此该技术还可应用于动态传感领域。

条支路,分别利用普通反射镜和法拉第反射镜反射回偏振态(SOP)不变的斯托克斯光和 SOP 翻转 90° 的反斯托克斯光,再经 DWDM 合成后注入传感光纤。在检测端,将接收到的两个探测边带分别输入

到平衡检测器,差分输出的结果为正输入信号减去负输入信号,可消除共模噪声,且平衡检测与相同响应速度的单输入探测器相比,信噪比能改善 $\sqrt{2}$ 倍^[42-45]。图 15 为该实验中测量的单边带检测与平衡检测的 3 条时域波形,可以观察到平衡检测能有效消除偏振噪声,改善信噪比。

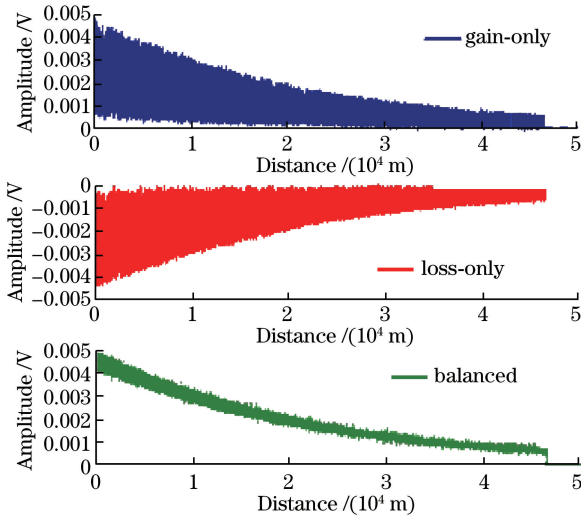


图 15 单边带检测和平衡检测的时域波形^[41]

Fig. 15 Time domain waveform obtained using the single-detector cases and balanced detection^[41]

2015 年, Sovran 等^[46]结合了快速调频和偏振分集技术,在 145 m 传感光纤上实现了扫频 BOTDA 高达 9700 BGS/s (BGS/S 表示每秒采集 BGS 次数)的实时采集速度以及 $4200 \mu\epsilon$ 的动态应变范围,实验采用差分脉冲对 BOTDA 进行快速传感,空间分辨率可达 10 cm。图 16 所示为该技术在光纤热区与冷区的 BGS 采集和 BFS 时域轨迹

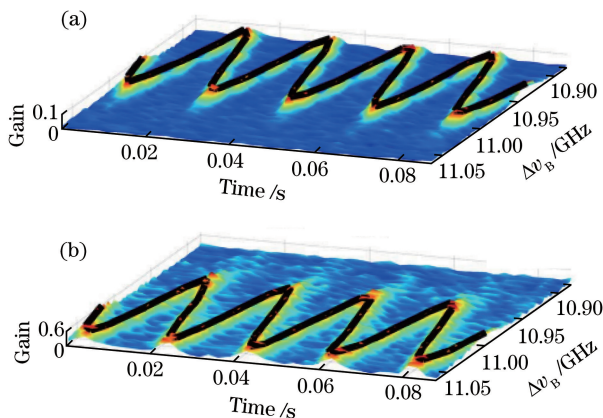


图 16 光纤冷区(a)与热区(b)的 BGS 采集和 BFS 的时域轨迹^[46]

Fig. 16 Measured BGSs as well as temporal traces of the BFS for cold (a) and hot (b) regions of the fiber^[46]

图像,完整 BGS 采集频率约为 50 Hz。

4 研究难点

除去抽运光功率变化带来的影响,随着光纤所受应变的增加,布里渊散射谱会呈现非线性展宽,导致峰值非线性下降,谱型趋于平坦。SA-BOTDA 技术的数据处理核心是将传感过程中的布里渊散射谱谱型视作不变;单斜坡法利用探测光频移的相对变化导致布里渊增益的变化来解调 BFS;双斜坡和多斜坡法利用 R_B 值与 $\delta\nu_B$ 的一一对应关系来解调 BFS。因此,解调算法对线宽的变化非常敏感,所以当应变变化范围较大时,SA-BOTDA 技术具有无法避免的测量误差。SF-BOTDA 技术的实现过程较为复杂,对仪器设备的要求较高,在探测器噪声背景下,对不同波长的探测光进行鉴别并构建布里渊散射谱的难度较大,且不同波长的抽运脉冲光-连续探测光对的数量有限,限制了动态测量范围。此外,高功率的光频率梳之间会产生强烈的非线性效应,尽管测量速度十分快,但很难在分布式光纤传感领域真正投入应用。快速变频技术减短了 BOTDA 扫频过程中在各个频率点的切换时间,在相对较短距离 (<1 km) 的传感光纤上能有效提高传感速度。且对于 1 km 以内的标准单模光纤,其偏振模色散不足以产生诸如四波混频之类的非线性效应。将快速调频技术与抑制偏振相关技术相结合,实现零叠加平均,使 BGS 采集时间达到仅与扫频间隔有关,可以广泛应用于设施健康监测和立体形状感知等领域。

5 本课题组的相关研究

5.1 Rayleigh-BOTDA 系统

由于 BOTDA 系统采用双端接入结构,一旦出现链路断点,接收端将无法接收到信号。为了克服这一缺点,如图 17 所示,本课题组设计并搭建了一种新型的基于瑞利散射的 BOTDA 传感系统^[47]。利用 2 个 EOM 并联来产生脉冲基底光,探测光信号由脉冲基底的 1 阶双边带后向瑞利散射光提供。此外,为了减少由于抽运损耗引起的非本地效应,系统采用双边带探测法。双边带探测光由斯托克斯光和反斯托克斯光组成,经 EOM 调制后在入射端具有相同的强度,并且相对抽运脉冲光具有相同的频移量。抽运光与斯托克斯光作用引起的抽运衰减能被反斯托克斯光作用引起的抽运增益补偿,因此能减小系统的非本地效应。

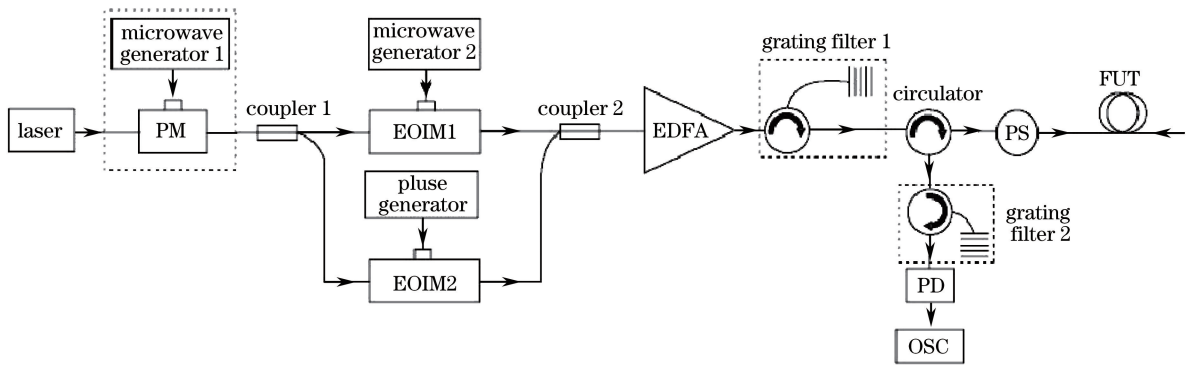
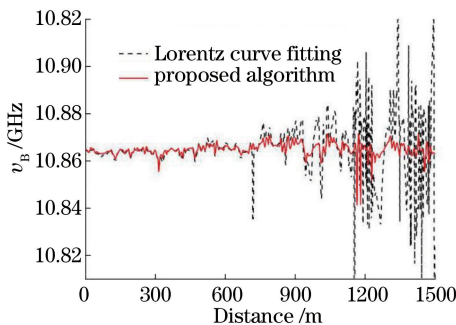


图 17 新型 RBOTDA 系统

Fig. 17 A novel RBOTDA system

5.2 BFS 提取算法研究

通过拟合布里渊散射谱的扫频数据来获取布里渊频移量是一种普遍使用的方法。但这种方法需要反复迭代求出参数向量的最小二乘解,不仅实时性差,还容易发生欠拟合现象,导致测量误差增大,不能满足动态测量的要求。针对该问题,提出了一种基于互相关卷积与高阶矩质心计算相结合的布里渊散射谱特征提取方法,将布里渊散射谱沿光纤的扫频数据与理想洛伦兹曲线作卷积,利用卷积结果峰值附近的理想洛伦兹线型特征进行高阶矩质心提取,并将提取结果作为布里渊频移的估计值。图 18 所示为该算法与洛伦兹拟合对光纤沿线的 BFS 提取结果对比。该算法避免了复杂的迭代求解所造成的测量时间延长,具有良好的实时性与测量精度,选取恰当的数据点数与阶数可将误差控制在 1 MHz 内^[48]。

图 18 所提算法与洛伦兹拟合的对比^[48]Fig. 18 Comparison of extracting BFS in LCF and the proposed algorithm^[48]

6 结束语

BOTDA 技术以其多参量传感、高精度及长距离等优势在大型监测场合中具有广泛的应用前景。传统 BOTDA 的测量时间至少在 min 量级,不具备

实时传感的能力,而动态 BOTDA 技术能有效实现低于 1 km 的短距离实时传感。但对于长距离 BOTDA,由于抽运脉冲周期受光纤长度的限制,实时性难以取得实质性的提高。在数据处理方面,通常采用基于最小二乘的洛伦兹拟合来进行 BFS 的提取,迭代求解的计算复杂度很高。特别是对于长距离、高空间分辨率的应用场合,完整 BGS 扫描的数据量很大,拟合算法十分不利于 BOTDA 的工程实时性。因此,高实时性的 BFS 提取算法是下一步的重要研究内容。

参 考 文 献

- [1] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(10): 1842-1851.
- [3] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [4] Bao X Y, Chen L. High performance BOTDA for long range sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7982: 798206.
- [5] Chaube P, Colpitts B G, Jagannathan D, *et al.* Distributed fiber-optic sensor for dynamic strain measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1067-1072.
- [6] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1170-

- 1176.
- [7] Motil A, Hadar R, Sovran I, *et al.* Gain dependence of the linewidth of Brillouin amplification in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27535-27541.
- [8] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [9] Peled Y, Motil A, Yaron L, *et al.* Distributed and dynamical Brillouin sensing in optical fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 775323.
- [10] Peled Y, Motil A, Yaron L, *et al.* Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 19845-19854.
- [11] Motil A, Danon O, Peled Y, *et al.* Pump-power-independent double slope-assisted distributed and fast Brillouin fiber-optic sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(8): 797-800.
- [12] Ba D X, Wang B Z, Zhou D W, *et al.* Distributed measurement of dynamic strain based on multi-slope assisted fast BOTDA[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9781-9793.
- [13] Yang G, Fan X Y, He Z Y. Strain dynamic range enlargement of slope-assisted BOTDA by using Brillouin phase-gain ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4451-4458.
- [14] Voskoboinik A, Wang J, Shamee B, *et al.* SBS-based fiber optical sensing using frequency-domain simultaneous tone interrogation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(11): 1729-1735.
- [15] Voskoboinik A, Wang J, Willner A, *et al.* Frequency-domain simultaneous tone interrogation for faster, sweep-free Brillouin distributed sensing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 77533G.
- [16] Voskoboinik A, Yilmaz O F, Willner A W, *et al.* Sweep-free distributed Brillouin time-domain analyzer (SF-BOTDA) [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B842-B847.
- [17] Voskoboinik A, Willner A E, Tur M. Extending the dynamic range of sweep-free Brillouin optical time-domain analyzer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(14): 2978-2985.
- [18] Li C L. Research on the system of Brillouin optical fiber sensor based on multi-wavelength light source [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 33-38.
李存磊. 基于多波长光源的布里渊光纤传感系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2012: 33-38.
- [19] Lu L D, Song Y J, Zhu F, *et al.* Coherent optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1735-1739.
- [20] Li C L, Wang F, Lu Y G, *et al.* SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(18): 1139-1141.
- [21] Zhang D Y, Nakarmi B, Zhang X P. Analysis of wavelength detuning, injected power, and injected mode effect on Fabry-Perot laser diode [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9270: 92700F.
- [22] Jin C, Guo N, Feng Y H, *et al.* Scanning-free BOTDA based on ultra-fine digital optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5277-5284.
- [23] Peled Y, Motil A, Tur M. Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8584-8591.
- [24] Wang B Z. Dynamic distributed Brillouin optical fiber sensing based on optical frequency-agile technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 26-29.
王本章. 基于光学捷变频的动态分布式布里渊光纤传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 26-29.
- [25] Dong Y K, Ba D, Jiang T F, *et al.* High-spatial-resolution fast BOTDA for dynamic strain measurement based on differential double-pulse and second-order sideband of modulation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 2600407.
- [26] Minardo A, Coscetta E, Coscetta A, *et al.* Sweep BOTDA for fast distributed sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103237K.
- [27] Kito C, Takahashi H, Toge K, *et al.* Simplified and fast acquirable BOTDA with frequency-swept probe pulse [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 1032305.
- [28] Kito C, Takahashi H, Toge K, *et al.* Dynamic strain measurement of 10-km fiber with frequency-swept pulsed BOTDA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1738-1743.
- [29] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. Jia D F, Yu Z H, Tan B, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 223-240.
Agrawal G P. 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.

- [30] Hotate K, Abe K, Song K Y. Suppression of signal fluctuation in Brillouin optical correlation domain analysis system using polarization diversity scheme [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24): 2653-2655.
- [31] Deventer M O V, Boot A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(4): 585-590.
- [32] Zadok A, Zilka E, Eyal A, *et al.* Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21692-21707.
- [33] Wiggeren G D V, Roy R. Transmission of linearly polarized light through a single-mode fiber with random fluctuations of birefringence [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(18): 3888-3892.
- [34] An Q, Li Y Q, Zhang L X. Research on the polarization performance of Brillouin optical time domain analysis sensor [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(31): 46-49.
安琪, 李永倩, 张立欣. 布里渊光时域分析传感器扰偏性能研究 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(31): 46-49.
- [35] Kurashima T, Tateda M, Horiguchi T, *et al.* Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(3): 360-362.
- [36] Song M P, Bao C, Ye X F. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 757-762.
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离分布式光纤传感器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 757-762.
- [37] Song M P, Zhuang B Y. Polarization-induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 711-715.
宋牟平, 庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术 [J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 711-715.
- [38] Bao X Y, Zhang C, Li W H, *et al.* Monitoring the distributed impact wave on a concrete slab due to the traffic based on polarization dependence on stimulated Brillouin scattering [J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 17(1): 015003.
- [39] Urricelqui J, López-Fernandino F, Sagues M, *et al.* Polarization diversity for Brillouin distributed fiber sensors based on a double orthogonal pump [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91576A.
- [40] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, *et al.* Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [41] López-Gil A, Domínguez-López A, Martín-López S, *et al.* Simple method for the elimination of polarization noise in BOTDA using balanced detection of orthogonally polarized Stokes and anti-Stokes probe sidebands [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91573U.
- [42] Smyth P P, Sayles A A, Back N R, *et al.* High-performance balanced dual-detector GaAs IC receiver for 565 Mbit/s optical heterodyne detection [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(21): 1414-1416.
- [43] Domínguez-López A, López-Gil A, Martín-López, *et al.* Signal-to-noise ratio improvement in BOTDA using balanced detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 26(4): 338-341.
- [44] Zhang L, Wang Z N, Li J, *et al.* Ultra-long dual-sideband BOTDA with balanced detection [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 206-210.
- [45] Minardo A, Coscetta A, Zeni L, *et al.* High-spatial resolution DPP-BOTDA by real-time balanced detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(12): 1251-1254.
- [46] Sovran I, Motil A, Tur M. Frequency-scanning BOTDA with ultimately fast acquisition speed [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1426-1429.
- [47] Shang Q F, Mao X, Zhang L X, *et al.* Research on a novel Rayleigh BOTDA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 199-203.
尚秋峰, 毛训, 张立欣, 等. 一种新型瑞利 BOTDA 系统的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 199-203.
- [48] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106011.
尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. 基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106011.