

光学学报

利用寻极大值法实现布里渊光时域反射技术频移快速定位及空间分辨率增强

黄秋茗¹, 陈映恺¹, 刘鑫煜¹, 陈理平^{3**}, 高波⁴, 付林林⁵, 李拥政^{6***}, 郭林峰^{1,2*}, 徐小敏⁷

¹南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044;

²江苏省大气海洋光电探测重点实验室, 江苏 南京 210044;

³中铁(上海)投资集团有限公司, 上海 200126;

⁴南京地铁建设有限责任公司, 江苏 南京 210019;

⁵中铁隧道集团二处有限公司, 河北 廊坊 065200;

⁶中铁三局集团华东建设有限公司, 江苏 南京 211153;

⁷剑桥大学工程系, 英国 剑桥 CB2 1PZ

摘要 提出一种基于布里渊光时域反射(BOTDR)系统的寻极大值法,在快速傅里叶变换(FFT)和短时傅里叶变换(STFT)的基础上,实现了频移的快速定位及系统空间分辨率的增强。对时域信号进行FFT处理,利用寻极大值法判断是否存在温变或应变信息,再通过逐级选取对应长度的时域信号来确定温变或应变频移发生的位置范围;对时域信号进行STFT处理,构建三维布里渊增益谱,通过寻极大值法构建布里渊频移分布来检测短距离温变或应变,从而提高系统空间分辨率。在实验中,利用基于等分FFT的寻极大值法,对2 km待测光纤中130 m段加热光纤的位置范围进行快速定位,系统运算时间缩短到原来的1/8。同时在设置探测光脉冲宽度为100 ns的条件下,利用基于STFT的寻极大值法,在2 km待测光纤上检测到0.6 m光纤长度的温度变化,实现了亚米级别的空间分辨率。与传统BOTDR系统相比,基于寻极大值法的STFT-BOTDR系统提高了实际应用中的检测速度与空间分辨率,工程实用性得以提高。

关键词 光纤光学; 布里渊光时域反射; 短时傅里叶变换; 寻极大值法; 定位; 空间分辨率

中图分类号 O437.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230560

1 引言

20世纪70年代,分布式光纤传感技术开始迅速发展^[1]。与传统点式传感技术相比,分布式光纤传感技术不仅可以实现沿光纤长度每个位置温度和应变值的精准测量^[2-4],还具有耐高温、占地面积小、抗电磁性好、可铺设距离长等优点,引起了研究人员的广泛关注。布里渊光时域反射(BOTDR)系统是一种典型的分布式光纤传感系统^[5],其通过将脉冲光发射到光纤的一端,并在光纤同一端检测后向散射的自发布里渊光信号来实现光纤传感。BOTDR系统的单端检测优势可以方便光纤安装和现场测量,使其广泛应用到各种大型工程领域的结构健康和安全监测^[6-7]中,特别是土木工程^[8-9]、通信^[10]、石油化工^[11]、电力工业^[12]、自然环境监测^[13-14]等领域。目前BOTDR系统的时频分析方法主要有两种,分别为扫频法和短时傅里叶变换(STFT)法^[15]。由于STFT对整个布里渊散射谱的宽

带信号进行处理,宽带信号的采集时间短,系统反应快,更适合工程应用。

空间分辨率和频率分辨率是BOTDR系统两个重要的性能参数,空间分辨率与脉冲宽度成正比,频率分辨率与电信号信噪比、频率步长、布里渊增益谱的中心频率和半峰全宽有关^[16-17]。同时,如果BOTDR系统采取STFT算法进行解算,系统的空间分辨率还将与窗函数本身长度有关。选择一个短的窗函数会提高空间分辨率,但窗内有效信号少,会导致频率分辨率变差;选择一个长的窗函数会提高频率分辨率,但窗长增加会导致空间分辨率变差。根据不确定性原理,空间分辨率与频率分辨率不能同时任意小,它们的乘积受到一定值的限制,这两个性能参数难以同时达到更好的效果^[18-19]。同时,STFT的运算时间与设置的频率步长和滑窗间距有关,提高系统频率分辨率会增加系统运算时间。

本文对基于STFT的BOTDR系统算法进行改

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-03-17; 录用日期: 2023-04-10; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62175113)、江苏省重点研发计划(BE2022076)

通信作者: *guolf_nj@163.com; **chenlipingzt@163.com; ***liyongzhengzt@163.com

进,提出一种新的寻极大值法,并对原始布里渊增益谱进行处理,构建布里渊频移曲线,在脉冲宽度为 100 ns 的情况下空间分辨率达到 0.6 m。不断地对原始时域信号进行等分,并同时快速傅里叶变换(FFT)处理,配合使用寻极大值法,实现温变或应变段的快速定位。将该方案与基于 STFT 的 BOTDR 系统结合,可以明显缩短系统运算时间,更有利于工程化应用。

2 原理

2.1 基于等效拟合法的 STFT 模型

在基于 STFT 的 BOTDR 系统中,温度或应变信息是从自发布里渊散射光的布里渊增益谱中解调出来的。STFT 过程是以一定窗长、一定滑窗间距对光纤沿线的时域信号进行傅里叶变换,STFT 过程得到的布里渊增益谱信号等效为一定窗长内不同位置信号的集合。将窗长 h 等分为 m 份,每份的长度为 Δh ,则系统测量的布里渊增益谱为 m 个子布里渊信号 $G_i(v_b, z_0 + i\Delta h)$ 的叠加结果,位置点 z_0 处的布里渊增益谱 $G(v, z_0)$ 可表示为

$$G(v, z_0) = \sum_{i=1}^m a_i G_i(v_b, z_0 + i\Delta h), \quad (1)$$

式中: v_b 为常温段光纤的布里渊频移; a_i 表示权重系数。

当位置点 z_1 处对应窗长内的 m 个子布里渊信号中有 n 份含有部分温变或应变信息,那么构建的布里渊增益谱是两种不同中心频率的子布里渊信号的集合,则位置点 z_1 处的布里渊增益谱 $G(v, z_1)$ 为

$$G(v, z_1) = \sum_{i=1}^n a_i G_i(v_i, z_1 + i\Delta h) + \sum_{i=n+1}^m a_i G_i(v_b, z_1 + i\Delta h), \quad (2)$$

式中: v_i 为温变或应变段光纤的布里渊频移。

两种不同中心频率的 v_b 和 v_i 的布里渊增益谱在频谱图上叠加,形成拼接谱,系统测量到的布里渊增益谱上会出现两个峰,图 1 所示为出现两个峰的布里渊拼接谱。

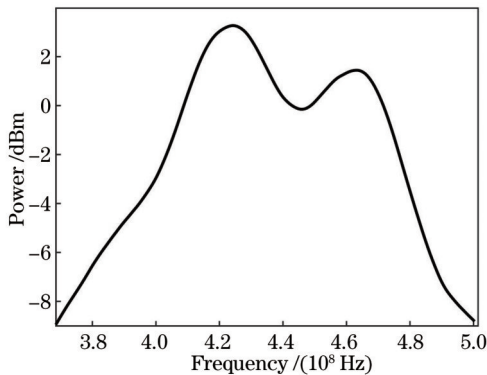


图 1 布里渊拼接谱

Fig. 1 Brillouin splicing spectrum

2.2 基于等分 FFT 的寻极大值法

与基于 STFT 的 BOTDR 系统一样,对含有温变或应变信息的布里渊散射信号进行 FFT 处理,同样会得到有两个峰的拼接谱,因此可以通过追踪布里渊增益谱的峰值分布来快速分辨信号中是否含有温变或应变信息。本文对时域信号不断等分,再通过 FFT 处理来构建频谱,并利用寻极大值法处理频谱图来实现温变或应变位置范围的快速定位。

对由 FFT 处理构建的频谱进行线性拟合,在常温情况的布里渊中心频率两边各 100 MHz 的频率范围内对频谱 $V(x)$ 进行寻极大值处理,极大值的判定条件为

$$V(x) - V(x - \Delta v) > 0 \&\& V(x + \Delta v) - V(x), \quad (3)$$

式中: Δv 为频率步长; $\&\&$ 表示两个条件需要同时满足。通过式(3)可得到极大值 $G[V(x_m)]$ 和极大值所对应的频率 $V(x_m)$ 。

极大值算法不仅可以寻到常温峰和温变或应变频移峰,还可以寻到由信号波动导致的噪声峰值,因此需要对极大值进行判断。理想情况下,布里渊散射光的频谱满足洛伦兹曲线形式,即

$$G^L(v) = \frac{g(\Gamma/2)^2}{(v - v_b) + (\Gamma/2)^2}, \quad (4)$$

式中: g 为布里渊峰值强度; v_b 为布里渊频移; Γ 为布里渊峰值增益谱的半峰全宽。

由于 BOTDR 系统中噪声的影响,布里渊增益谱在不同频率处的强度都是对应频率处的信号强度与噪声强度之和,不同频率处的噪声强度不仅与系统器件产生的散粒噪声、热噪声有关,还与 BOTDR 系统的信号强度有关,因此测量到的布里渊增益谱可以通过洛伦兹谱叠加噪声谱的方式得到,而噪声谱可以通过信噪比和信号强度相乘得到。图 2 所示为常温情况下实际测量的布里渊增益谱和由洛伦兹谱拟合得到的布里渊增益谱。

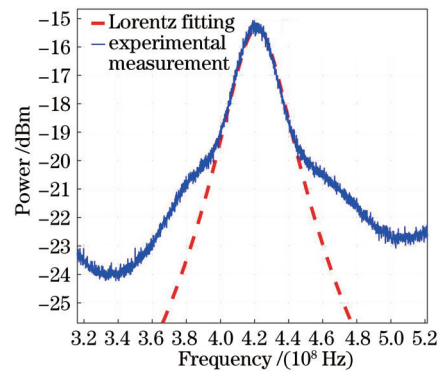


图 2 布里渊增益谱

Fig. 2 Brillouin gain spectrum

基于上述分析,可以通过式(5)判断极大值所对应的频率 $V(x_m)$ 是否为温变或应变频移峰,即

$$G[V(x_m)] \geq G^L[V(x_m)] + \beta R_{sn}^re[V(x_m)] \cdot G(v_b), \quad (5)$$

式中: β 为比例常数; $G^L[V(x_m)]$ 为频率 $V(x_m)$ 在洛

伦兹曲线形式下的信号强度; $R_{sn}^{rc}(x)$ 为噪声在不同频率处的相对信噪比; $G(v_b)$ 为常温情况下测量的布里渊频移对应的信号强度。将满足条件后得到的极大值 $G[V(x_m)]$ 和极大值所对应的频率 $V(x_m)$ 代入式 (5), 存在满足条件的极大值时, 则可以确定相对应的时域信号中含有的温变或应变信息。

为了快速定位温变或应变位置范围, 对时域信号进行不断等分。首先, 对整个脉冲周期产生的布里渊信号进行 FFT 处理, 通过上述方法判断温变或应变是否发生, 如果发生, 再将整个脉冲周期产生的布里渊信号

进行二等分, 并分别进行 FFT 处理, 利用同样的方法来判断哪一个信号中含有温变或应变信息; 然后, 对含有温变或应变信息的布里渊信号进行等分, 从而不断缩小温变或应变位置范围, 直到子信号都含有温变或应变信息; 最后, 根据光时域反射仪测试原理确定温变或应变对应探测光纤中实际的位置范围。图 3 为不断等分布里渊信号来实现快速定位的原理示意图, 其中 L_x 为整个脉冲周期可测量的光纤时域长度。对于多段距离的温变或应变信号, 可以同时针对不同位置的时域信号进行等分, 从而确定多处温变或应变的位置范围。

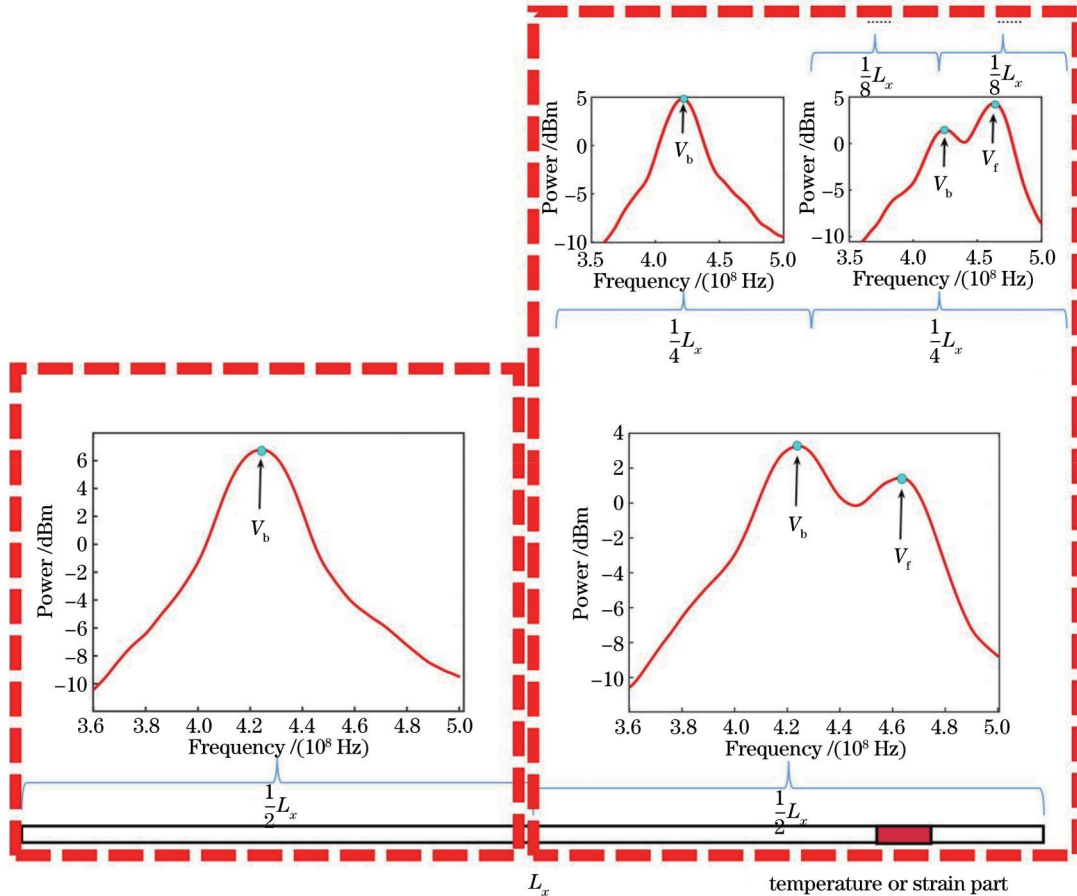


图 3 快速定位的原理示意图
Fig. 3 Schematic of quick positioning

通过基于等分 FFT 的寻极大值法快速定位的温变或应变实际长度不能无限短, 这是因为产生的峰值会被对应频率的噪声强度湮没。对于长距离的温变或应变信号, 可以继续对两个含有温变或应变信息的布里渊信号进行等分来判断温变或应变信息开始和结束的位置范围。进行傅里叶变换的布里渊信号长度不能无限小, 这是因为信号长度过短会导致频谱频率分辨率变差, 导致无法准确识别布里渊频移信息。可以先利用基于等分 FFT 的寻极大值法来确定一定长度的位置范围, 再对这一范围进行 STFT 处理来实现温变或应变的快速定位。

2.3 基于 STFT 的寻极大值法

在基于 STFT 的 BOTDR 系统中, 以布里渊增益谱最大信号强度处的频率值为布里渊频移, 如果一个窗长内构建的频谱为两个峰的拼接谱, 当温变或应变信息产生的峰值强度没有常温段大时, 系统无法识别相应位置的温变或应变信息, 从而导致空间分辨率下降。由此, 本文利用寻极大值法对 STFT 构建的三维布里渊增益谱进行处理, 构建布里渊频移分布来提高系统的空间分辨率。

先对由 STFT 构建的频谱进行寻极大值处理, 同时进行洛伦兹拟合, 再通过判定公式判断极大值所对应的频率是否为温变或应变频移峰。若存在温变或应

变频移峰,则以其峰值对应频率为布里渊频移;若不存在,则以布里渊增益谱中心频率为布里渊频移。

理想情况下,STFT窗长内一出现温变或应变信息就会产生次极大值。由于窗函数本身具有一定长度,且根据等效脉冲光拟合法,单个子布里渊信号是其前面一个脉冲长度内单位布里渊信号的集合^[20-22],因此,窗函数移动过程中包含的温变或应变信息的位置要比实际温变或应变段长度远一个窗长加一个脉冲长度。由于系统噪声的影响,由温变或应变信息产生的布里渊增益谱峰值要大于其对应频率下的噪声强度才会产生极大值峰。这一条件不仅与温变或应变长度有关,还与每个子布里渊信号含有的单位温变或应变布里渊信号数量和其对应权重系数有关。

由于等效脉冲光拟合法分析的单个子布里渊信号是其前面一个脉冲长度内单位布里渊信号的集合,为简化描述,将窗长和脉冲长度设置为相同的数值,则从实际温变或应变位置开始,一个窗长加实际温变或应变长度内的各子布里渊信号的分布系数为

$$H_1(x) = \begin{cases} x-1, & x \leq k \\ k, & k < x \leq m+1 \\ m+k-x+1, & m+1 < x \leq m+k \end{cases}, (6)$$

$$H_2(x) = \begin{cases} x-1, & x \leq m \\ m, & m < x \leq k+1 \\ m+k-x+1, & k+1 < x \leq m+k \end{cases}, (7)$$

式中: k 为实际温变或应变段长度按间距 Δh 等分的份数; $H_1(x)$ 为窗长大于实际温变或应变段长度情况下的分布系数; $H_2(x)$ 为窗长小于实际温变或应变段长度情况下的分布系数。

同样,温变或应变信息的频率强度要大于噪声谱强度才会产生极大值峰,判定式为

$$\begin{cases} A = \sum_{i=1}^j a_i H(i) \Delta G_{v_i} / \left\{ \sum_{i=1}^m a_i [k - H(i)] \Delta G_{v_b} \right\} \\ B = [G^L(v_f) + R_{sn}^e(v_f) \cdot G(v_b)] / G(v_b) \\ A \geq B \end{cases}, (8)$$

式中: ΔG_{v_i} 为单位温变或应变布里渊信号强度; ΔG_{v_b} 为单位温变或应变的布里渊信号强度; j 为一个窗长内包含温变或应变信息的子布里渊信号份数。

当 j 小于实际温变或应变段长度时,分布系数 $H_1(x)$ 和 $H_2(x)$ 都与实际温变或应变段长度无关。当 $A=B$ 时,由式(8)解得 $j=\lambda_1$,所以实际温变或应变段长度大于 $\lambda_1 \cdot \Delta h$ 时构建的布里渊频移曲线长度会大于 $2h - 2\lambda_1 \cdot \Delta h$ 。对布里渊频移曲线进行修正,曲线方程两端各减去 $h - \lambda_1 \cdot \Delta h$ 就得到实际温变或应变段长度。

当实际温变或应变段长度小于 $\lambda_1 \cdot \Delta h$ 时, A 中一个窗长内包含的温变或应变信息的子布里渊信号份数 j 要大于 λ_1 才满足 $A \geq B$ 。当 $A=B$ 时,由式(8)解得 $j=\lambda_2$ ($\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq m$),因此实际温变或应变段长度小于

$\lambda_1 \cdot \Delta h$ 时构建的布里渊频移曲线长度会大于 $2h - 2\lambda_2 \cdot \Delta h$ 。对布里渊频移曲线进行修正,曲线方程两端各减去 $h - \lambda_2 \cdot \Delta h$ 就得到实际温变或应变段长度。

当 A 中一个窗长内包含温变或应变信息的子布里渊信号份数 j 等于 m 时, $A < B$,那么窗函数起始位置要远于实际温变或应变段的起始位置才能产生极大值峰,此时 A 的表达式为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^m a_i H(i + \theta) \Delta G_{v_i}}{\sum_{i=1}^m a_i [k - H(i + \theta)] \Delta G_{v_b}}, (9)$$

式中: θ 为窗函数起始位置减去实际温变或应变段的起始位置的长度。当 $A=B$ 时,由式(8)解得 $\theta=\lambda_3$,因此实际温变或应变段长度进一步减小时构建的布里渊频移曲线长度会小于 $2\lambda_3$ 。对布里渊频移曲线进行修正,曲线方程两端各加上 λ_3 长度就得到实际温变或应变段的长度。且当 θ 刚好无解时,该长度为基于STFT的寻极大值法可检测的最小空间距离。

3 实验结果及讨论

3.1 系统装置设计

所使用的BOTDR系统装置如图4所示,1549.8 nm激光器发出的线宽为3 kHz的激光通过一个9:1的耦合器(coupler 1)被分成两个分支。在光强较大的上分支中,探测光被半导体光放大器(SOA)调制,形成一个100 ns宽度的矩形脉冲光,消光比超过30 dB,上升/下降沿时间小于5 ns。随后,脉冲光通过环形器(circulator 1)进入到2 km的待测光纤(FUT)中,待测光纤产生的自发布里渊散射光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,再经过环形器(circulator 2)与光纤布拉格光栅(FBG),滤去放大器自发辐射噪声。在光强较小的下分支中,参考光路通过扰偏器(PS)来打乱参考光的偏振态,使其更容易与探测光拍频。通过环形器(circulator 2)返回的自发布里渊散射光信号进入一个5:5的耦合器(coupler 2)与参考光混合,并进行拍频。拍频后的高频信号通过光电探测器(PD)进行光电转换,产生10.8 GHz的射频(RF)信号。射频电信号再通过信号降频处理模块转换为几百MHz的中频(IF)信号。输出的中频信号由数据采集卡(DAQ)采集。半导体光放大器与数据采集卡连接,用于同步触发(trigger),以寻找光纤数据起始位置。

3.2 温变位置范围快速定位的实验验证

为了验证基于等分FFT的寻极大值法可实现温变位置范围的快速定位,设计了图5所示的实验待测光纤1。在长度为2 km的光纤的1665 m处,将待测光纤缠绕130 m放入水浴锅中进行加热,水浴锅温度设置为50 °C。泵浦脉冲宽度设置为100 ns,频率设置为40 kHz,其可探测的最大光纤长度为2500 m。基于等分FFT的寻极大值法的解调过程如下:首先,将采集

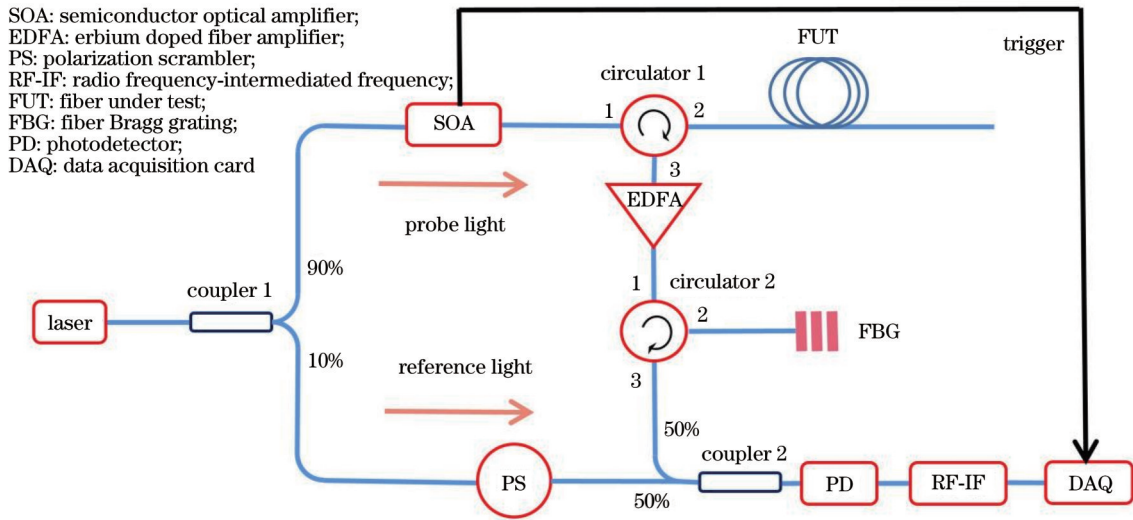


图 4 基于 STFT 的 BOTDR 系统装置图

Fig. 4 Device diagram of BOTDR system based on STFT

的时域信号按脉冲周期位置等分为两份,都进行 FFT 处理,并重复 12800 次,将这些结果取平均值后作为原始的布里渊增益谱;其次,对频谱进行线性拟合和洛伦

兹拟合以找到极大值,并用式(5)来判定是否含有温变信息;最后,不断将含有温变信息的时域信号进行等分处理,确定待测光纤受水浴锅加热的位置范围。

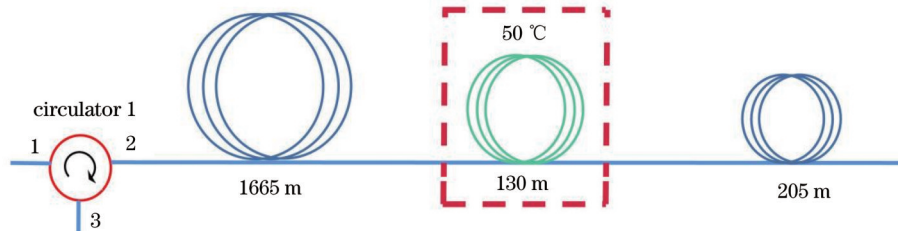


图 5 实验待测光纤 1

Fig. 5 Optical fiber to be tested in experiment 1

图 6(a)所示为对脉冲周期内 0~1250 m 和 1250~2500 m 的时域信号进行 FFT 处理得到的频谱,可以看出,待测光纤受水浴锅加热的位置在 1250~2500 m 范围内。图 6(b)所示为对待测光纤 1563~1719 m 和 1719~1875 m 的时域信号进行 FFT 处理得到的频谱,两条谱线中都含有受温变影响的频移峰,可以得出待测光纤受水浴锅加热的位置范围为 1563~1875 m,长度为最大可探测光纤长度 2500 m 的 1/8。运用传统基于 STFT 的 BOTDR 系统检测 12800 组数据中的 130 m 光纤温变数据,系统的运算时间为 482 s。利用基于等分 FFT 的寻极大值法来检测 130 m 温变信息,系统的运算时间为 68 s,时间缩短到原来的 1/8。

图 6(c)所示为对待测光纤 1641~1680 m 和 1680~1719 m 的时域信号进行 FFT 处理得到的频谱,可以看到,1641~1680 m 段既包含常温信息峰又包含温变信息峰,1680~1719 m 段只包含温变信息峰,因此待测光纤受水浴锅加热的开始位置在 1641~1680 m 内。图 6(d)所示为对待测光纤 1719~1758 m 和 1758~1797 m 的时域信号进行 FFT 处理得到的频

谱,可以看到,1719~1758 m 段只包含温变信息峰,1758~1797 m 段既包含常温信息峰又包含温变信息峰,因此待测光纤受水浴锅加热的结束位置在 1758~1797 m 内。

3.3 空间分辨率增强的实验验证

为了验证基于 STFT 的寻极大值法可实现空间分辨率的增强,设计了图 7 所示的实验待测光纤 2。在约 940 m 处,将待测光纤缠绕成 4 卷,每一卷的长度分别为 10、5、1、0.5 m,且相邻两卷光纤之间的距离为 30 m,利用水浴锅对这 4 卷光纤进行加热。泵浦脉冲宽度设置为 100 ns,频率设置为 40 kHz。图 8(a)~(c)所示分别为待测光纤的 925~1065 m 段常温、加热到 40 °C 和加热到 50 °C 时的布里渊增益谱分布。图 9(a)、(b)所示分别为通过传统寻峰算法从图 8(b)、(c)所示的布里渊增益谱分布中提取的相应的布里渊频移分布。从图 9(a)可以看到,基于传统寻峰算法的 STFT 算法只能检测到 10 m 长度的温度变化,且在 10 m 段由于空间分辨率恶化,检测距离仅为 12.8 m。50 °C 的布里渊增益谱峰值要强于 40 °C 的布里渊增益谱峰值,

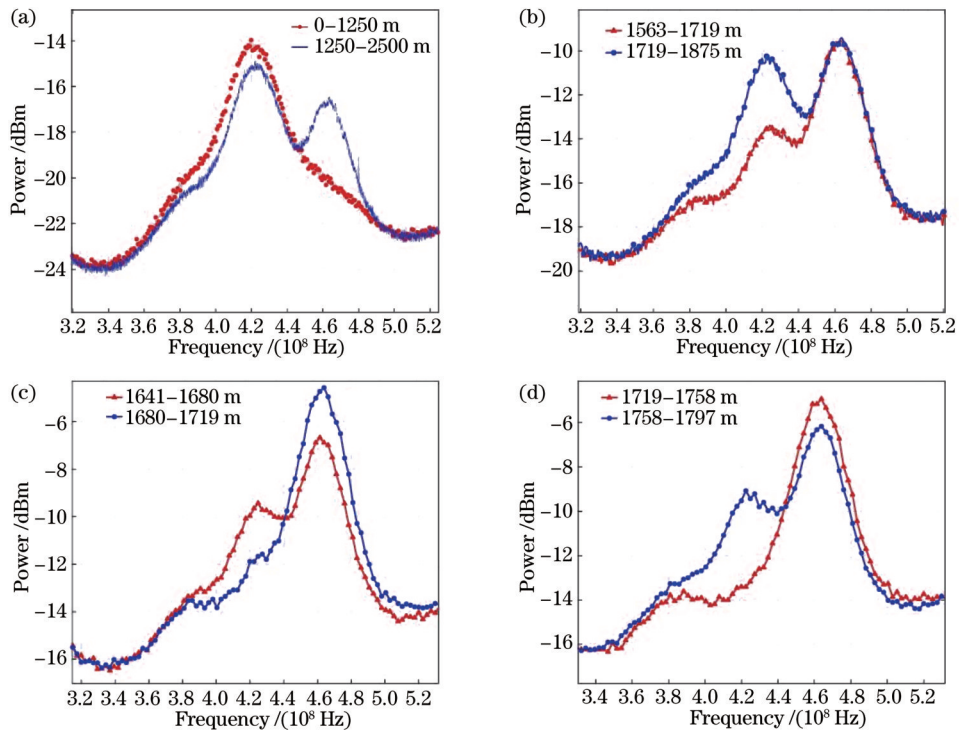


图 6 由等分 FFT 构建的频谱。(a)对 0~1250 m 和 1250~2500 m 时域信号进行 FFT 处理得到的频谱;(b)对 1563~1719 m 和 1719~1875 m 时域信号进行 FFT 处理得到的频谱;(c)对 1641~1680 m 和 1680~1719 m 时域信号进行 FFT 处理得到的频谱;(d)对 1719~1758 m 和 1758~1797 m 时域信号进行 FFT 处理得到的频谱

Fig. 6 Frequency spectra constructed by equal division FFT. (a) Frequency spectra by FFT processing of 0-1250 m and 1250-2500 m time domain signals; (b) frequency spectra by FFT processing of 1563-1719 m and 1719-1875 m time domain signals; (c) frequency spectra by FFT processing of 1641-1680 m and 1680-1719 m time domain signals; (d) frequency spectra by FFT processing of 1719-1758 m and 1758-1797 m time domain signals

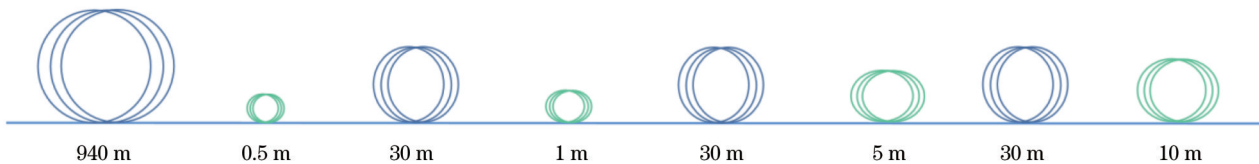


图 7 实验待测光纤 2

Fig. 7 Optical fiber to be tested in experiment 2

则可检测的最小距离也会缩小。如图 9(b)所示,能检测到 5 m 长度和 10 m 长度的温度变化,但对应的检测长度恶化为 4.6 m 和 12.2 m。图 9(c)、(d)所示为使用基于 STFT 的寻极大值法处理得到的布里渊频移分布。同样地,由于 50 °C 的布里渊增益谱峰值要强于 40 °C 的布里渊增益谱峰值,基于 STFT 的寻极大值法在待测光纤的温度为 40 °C 时检测不到 0.5 m 长度的温度变化,而在 50 °C 时可以检测到,且基于 STFT 的寻极大值法在待测光纤的温度为 50 °C 时需要修正的长度大于 40 °C 时的长度。图 9(c)中检测到的温变段长度分别为 10.6、5.4、1.2 m,而图 9(d)中检测到的温变段长度分别为 10.6、5.0、1.2、0.6 m。将待测光纤部分加热到 40 °C 和脉冲宽度设置为 100 ns 时,基于传统寻峰算法的 STFT-BOTDR 系统空间分辨率为

12.8 m,使用本文基于 STFT 的寻极大值法处理,系统的空间分辨率优化到 1.2 m。待测光纤部分加热到 50 °C 和脉冲宽度设置为 100 ns 时,基于传统寻峰算法的 STFT-BOTDR 系统的空间分辨率为 4.6 m,而使用基于 STFT 的寻极大值法处理时,系统的空间分辨率优化到 0.6 m。

4 结 论

提出一种新的利用寻极大值法实现 BOTDR 技术频移快速定位及空间分辨率增强的技术。将原始信号进行不断等分,并同时进行了 FFT 处理,利用寻极大值法处理二维布里渊增益谱,确定温变或应变段发生的位置范围,从而减少系统运算时间。此外,对由 STFT 得到的三维布里渊增益谱进行寻极大值处理,构建布

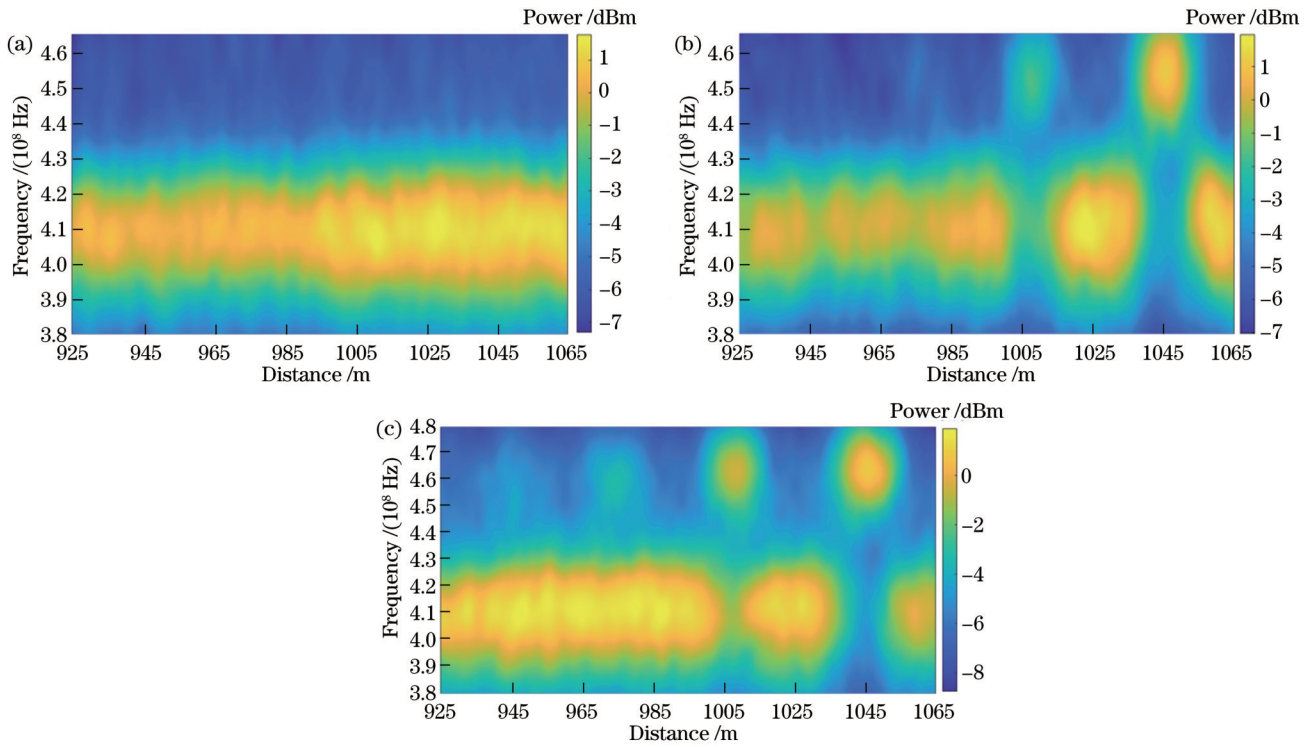


图 8 待测光纤在不同温度时的布里渊增益谱分布。(a)待测光纤保持常温;(b)加热到 40 °C;(c)加热到 50 °C

Fig. 8 Brillouin gain spectra of tested optical fiber at different temperatures. (a) Keep the optical fiber at room temperature; (b) heat to 40 °C; (c) heat to 50 °C

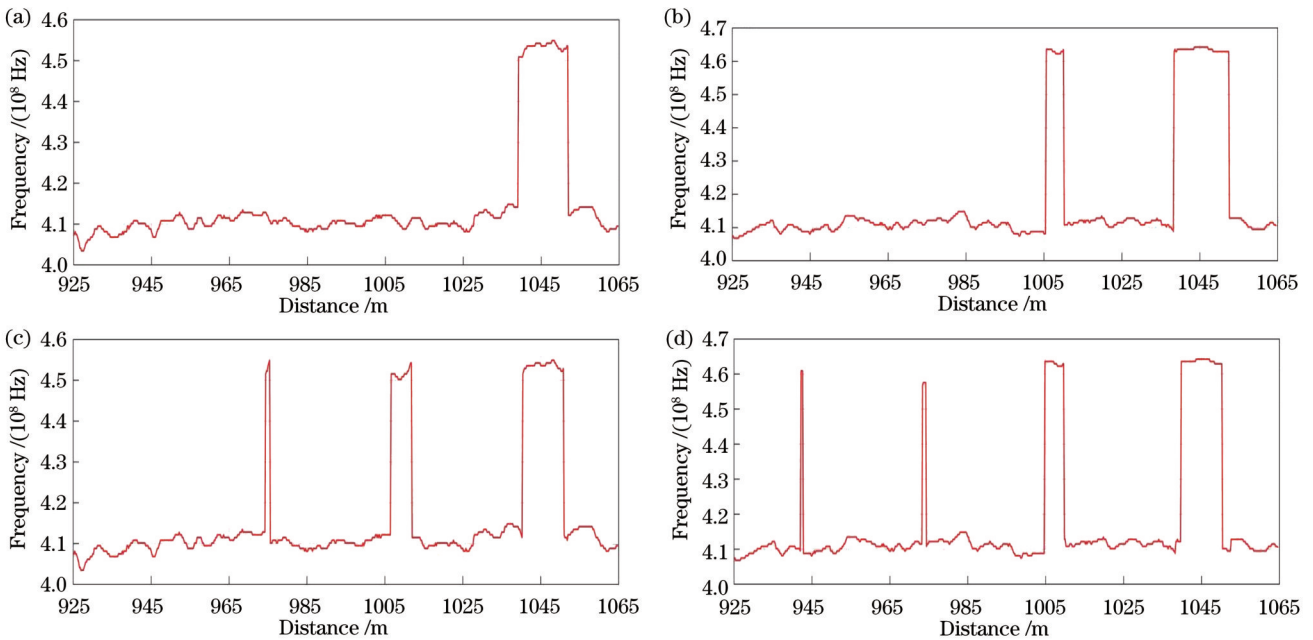


图 9 不同条件下的布里渊频移分布。(a)传统寻峰算法,待测光纤为 40 °C;(b)传统寻峰算法,待测光纤为 50 °C;(c)寻极大值法,待测光纤为 40 °C;(d)寻极大值法,待测光纤为 50 °C

Fig. 9 Brillouin frequency shift distribution at different conditions. (a) Traditional peak searching algorithm & 40 °C optical fiber; (b) traditional peak searching algorithm & 50 °C optical fiber; (c) maximum-seeking method & 40 °C optical fiber; (d) maximum-seeking method & 50 °C optical fiber

里渊频移分布,以降低可检测的最小温变或应变段长度,提高系统空间分辨率。在实验验证中,设计了基于 STFT 的 BOTDR 系统,通过基于等分 FFT 的寻极大

值法,对 2 km 的待测光纤中的 130 m 加热段进行快速定位,将系统运算时间缩短到原来的 1/8,提高了运算速度。同时在设置探测光脉冲宽度为 100 ns 的条件

下,在 2 km 的待测光纤上实现了 0.6 m 的空间分辨率。实验结果表明,所提方法可以在不牺牲其他传感性能参数的情况下,使现有基于 STFT 的 BOTDR 系统仪器性能再次提升,能在有限的系统成本预算条件下获得更优的系统性能,便于低成本中精密 BOTDR 系统在更多的工地、桥梁建设等场合批量使用,从而加速分布式光纤传感技术的工程化应用。

参 考 文 献

- [1] Doebbling S W, Farrar C R, Prime M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review[R]. New Mexico: University of North Texas Libraries, 1996.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Mizuno Y, Theodosiou A, Kalli K, et al. Distributed polymer optical fiber sensors: a review and outlook[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(9): 1719-1733.
- [5] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, et al. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry (special issue on optical fiber cables and related technologies) [J]. *IETCE Transactions on Communications*, 1993, 76: 382-390.
- [6] Galindez-Jamióy C A, López-Higuera J M. Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications[J]. *Journal of Sensors*, 2012, 2012: 1-17.
- [7] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. *Optics and Laser Technology*, 2016, 78: 81-103.
- [8] DeMerchant M, Brown A, Bao X Y, et al. Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(13): 2755-2759.
- [9] Bado M F, Casas J R. A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1818.
- [10] 夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1506001.
Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1506001.
- [11] 温剑峰. 基于 BOTDR 系统的石油储罐温度和应变同时测量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
Wen J F. Study on simultaneous measurement of temperature and strain of oil storage tank based on BOTDR system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [12] 张洪英, 杨志远, 崔荣鹏, 等. 基于 BOTDR 的海上风力发电机桩基水平荷载性能研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306016.
Zhang H Y, Yang Z Y, Cui R P, et al. Horizontal load test on offshore wind turbine pile foundation based on BOTDR[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306016.
- [13] 程刚, 王振雪, 朱鸿鹄, 等. 基于分布式光纤感测的岩土体变形监测研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(19): 1900004.
Cheng G, Wang Z X, Zhu H H, et al. Summary of research on deformation monitoring of rock and soil based on distributed optical fiber sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 1900004.
- [14] Zhou Z C, Wang H Y, Wang Y, et al. Distributed static and dynamic detection of an acoustic wave in a Brillouin random fiber laser[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 772-780.
- [15] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, et al. Strain variation measurement with short-time Fourier transform-based Brillouin optical time-domain reflectometry sensing system[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(22): 1624-1626.
- [16] Soto M A, Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 31347-31366.
- [17] Yu Y F, Luo L Q, Li B, et al. Frequency resolution quantification of Brillouin-distributed optical fiber sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2367-2370.
- [18] 谷行, 白清, 王清琳, 等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(1): 25-31.
Gu H, Bai Q, Wang Q L, et al. Research on accuracy improvement of Brillouin optical time domain reflectometer temperature measurement based on window function optimization [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(1): 25-31.
- [19] Luo L Q, Parmigiani F, Yu Y F, et al. Frequency uncertainty improvement in a STFT-BOTDR using highly nonlinear optical fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3870-3881.
- [20] Wang F, Zhan W W, Zhang X P, et al. Improvement of spatial resolution for BOTDR by iterative subdivision method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3663-3667.
- [21] Huang Q, Sun J Q, Jiao W T, et al. Improvement of performance for Raman assisted BOTDR by analyzing Brillouin gain spectrum[J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 116.
- [22] 王峰, 张旭革, 路元刚, 等. 提高布里渊光时域反射应变仪测量空间分辨率的等效脉冲光拟合法[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 43-49.
Wang F, Zhang X P, Lu Y G, et al. Improvement of spatial resolution for strain measurement with Brillouin optical time-domain reflectometer by fitting method based on equivalent optical pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 43-49.

Fast Positioning of Brillouin Optical Time Domain Reflectometry Frequency Shift and Enhancement of Spatial Resolution Using Maximum-Seeking Method

Huang Qiuming¹, Chen Yingkai¹, Liu Xinyu¹, Chen Liping^{3**}, Gao Bo⁴, Fu Linlin⁵,
Li Yongzheng^{6***}, Guo Linfeng^{1,2*}, Xu Xiaomin⁷

¹*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Jiangsu Key Laboratory for Optoelectronic Detection of Atmosphere and Ocean, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

³*China Railway (Shanghai) Investment Group Co., Ltd., Shanghai 200126, China;*

⁴*Nanjing Metro Construction Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China;*

⁵*China Railway Tunnel Group No.2 Co., Ltd., Langfang 065200, Hebei, China;*

⁶*China Railway No.3 Group East China Construction Co., Ltd., Nanjing 211153, Jiangsu, China;*

⁷*Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, United Kingdom*

Abstract

Objective In the past three decades, Brillouin optical time domain reflectometry (BOTDR) has attracted widespread attention from researchers and has been applied to health and safety monitoring in various engineering structures. BOTDR based on short-time Fourier transform (STFT) performs signal processing on the broadband signal of the Brillouin scattering spectrum. The acquisition time of the broadband signal is shorter than that of the frequency sweep system, and therefore system response is swifter. Spatial resolution and frequency resolution are two important performance parameters of the STFT-BOTDR system. The former, spatial resolution, is proportional to optical pulse width and related to the form and length of the window function. The latter is related to the signal-to-noise ratio of the electrical signal, step length of frequency, center frequency of the Brillouin gain spectrum, and full width at half maximum. The two resolutions correlate with each other. Meanwhile, the computing time of the STFT is related to the set parameters of frequency step length and of the sliding window. As a result, improving the system frequency resolution will increase the system's computing time. How can we optimize the photoelectric design and improve the efficiency of the demodulation algorithm under the current system of typical BOTDR to obtain highly enhanced spatial resolution by using economic optical pulses of common width (instead of using narrow pulses and other costly photoelectric modules)? The solution to the question is essential to the extensive and large-scale application of BOTDR in the engineering field.

Methods We propose a maximum-seeking method based on the BOTDR system, which realizes the rapid positioning of frequency shift and the enhancement of system spatial resolution based on fast Fourier transform (FFT) and STFT. The maximum-seeking method based on the equal division FFT process first performs FFT processing on the time-domain signal and linear fitting and then maximum-seeking processing on the spectrum within the frequency range of 100 MHz on both sides of the Brillouin center frequency. Then, by using the judgment Eq. (5), it determines whether there is temperature variation or strain information and then continuously divides the time-domain signal. Finally, it selects the corresponding length of the time-domain signal to determine the temperature variation or strain frequency shift range, thus realizing the rapid positioning of frequency shift and reducing the system's operation time. The maximum-seeking method based on STFT first processes the time-domain signal with STFT to construct a three-dimensional Brillouin gain spectrum and then builds a Brillouin frequency shift distribution through the maximum-seeking method. The Brillouin frequency shift curve is corrected by using the judgment Eq. (7) in different situations, determining the length of the short-distance temperature variation or strain segment, thereby improving the system's spatial resolution.

Results and Discussions In the experiment, we design a BOTDR system based on STFT and quickly locate the heated fiber in a section of 130 m the fiber of 2 km under test. We use the spectrum constructed with equal division FFT (Fig. 6) to determine the position of temperature occurrence based on whether the frequency shift peaks appear in each segment of the spectrum. The traditional STFT-BOTDR system detects fiber temperature variation data of 130 m in 12800 groups of data, with a system operation time of 482 s. By using the maximum-seeking method based on equal division FFT, the system operation time for detecting the temperature variation information of 130 m is reduced to 68 s, which is 1/8 of the original time. The calculation speed is much improved. At the same time, to verify the enhancement of spatial resolution by using the maximum-seeking method based on STFT, we design test fiber 2 (Fig. 7) with heating section temperatures

set at 40 °C and 50 °C. Under the condition of setting the probe light pulse width to 100 ns, we use the traditional peak search algorithm and the maximum-seeking method to process the constructed Brillouin frequency shift distribution (Fig. 9). From the experimental data of Brillouin frequency shift distribution (Fig. 9), it can be seen that after using the STFT-based maximum-seeking method, the system's spatial resolution is optimized from 12.8 m to 1.2 m under the heating section at 40 °C and from 4.6 m to 0.6 m under the heating section at 50 °C.

Conclusions We propose a new method to achieve rapid frequency shift positioning and spatial resolution enhancement in the BOTDR by using the maximum-seeking method. By continuously dividing the original signal and performing FFT processing, the maximum-seeking method processes the two-dimensional Brillouin gain spectrum to determine the position range of temperature variation or strain segments, reducing the system's computing time. At the same time, the three-dimensional Brillouin gain spectrum obtained from STFT is processed by using the maximum-seeking method to construct Brillouin frequency shift distribution, reducing the minimum detectable temperature variation or strain segment length and enhancing the system's spatial resolution. In the experiment, an STFT-based BOTDR system is designed. By using the maximum-seeking method based on equal division FFT, the heated fiber of 130 m in the test fiber of 2 km is quickly located, reducing the system's operation time to 1/8 of the original and improving calculation speed. Simultaneously, under the condition of setting the probe light pulse width to 100 ns, a spatial resolution of 0.6 m is achieved on the test fiber of 2 km. The experimental results show that this method can further improve the performance of existing STFT-BOTDR systems without sacrificing other sensing performance parameters. By using the maximum-seeking method based on STFT, the sub-meter level spatial resolution is achieved. Compared with the traditional BOTDR system, the STFT-BOTDR system based on the maximum-seeking method has faster detection speed and better spatial resolution in engineering applications. Besides, this method helps to obtain higher system performance under limited system cost, making it easier for low-cost and high-precision BOTDR systems to be used in larger quantities at construction sites, bridges, and other occasions, thereby accelerating the engineering and large-scale application of distributed fiber optic sensing technology.

Key words fiber optics; Brillouin optical time domain reflectometry; short-time Fourier transform; maximum-seeking method; positioning; spatial resolution