

基于双谱边际谱的 Φ -OTDR 临近双振源定位方法

施 羿, 王原野, 赵 雷

(汕头大学 广东省数字信号与图像处理技术重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘要:针对相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)系统无法分别定位间距小于其脉冲宽度的临近双振源的问题,通过分析临近双振源条件下 Φ -OTDR 信号的高次谐波特征及其在空间中的分布特性,提出一种基于双谱边际谱的定位方法。该方法在不改变硬件器件的情况下,可提高 Φ -OTDR 系统对临近双振源的分辨能力。实验测试表明:在 200 ns 脉冲宽度下(对应 20 m 空间分辨率),无论双振源以不同频率还是以相同频率振动,该方法均能分辨并分别定位相距 5 m 的 2 个振源。该研究工作将促进 Φ -OTDR 在管道安全监测以及结构健康监测中的应用。

关键词:相位敏感型光时域反射仪; 双谱; 高次谐波; 空间分辨率

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)01-0014-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Localization method of Φ -OTDR near double sources based on bispectrum marginal spectrum

SHI Yi, WANG Yuanye, ZHAO Lei

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Signal and Image Processing, Shantou University, Shantou Guangdong 515063, China)

Abstract: Aiming at the problem that the phase sensitive Φ -optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) system can't locate the two adjacent sources whose spacing is less than its pulse width, this paper analyzes the high-order harmonic characteristics of Φ -OTDR signal and its spatial distribution characteristics under the condition of two adjacent sources, and proposes a location method based on the bispectrum marginal spectrum. This method can improve the locating ability of Φ -OTDR without any additional hardware. The experiments show that this method can separately locate two vibration sources with 5 m interval under 200 ns probe pulse (means 20 m spatial resolution) and it can work no matter the same or different frequencies the two vibration sources are. This work will help the application of Φ -OTDR system in pipeline safety monitoring and structural health monitoring.

Key words: Φ -optical time domain reflectometer; bispectrum; higher-order harmonics; spatial resolution

0 引言

1993 年, H. F. Taylor 等人首次提出可以使用光纤中的相干背向瑞利散射光作为检测工具, 并基于此提出了相位敏感型光时域反射仪(Φ -OTDR)^[1]技术。相比于普通 OTDR, Φ -OTDR 技术引入了光干涉过程, 因

收稿日期: 2019-06-17。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61801283)资助; 汕头大学科研启动基金(NTF18007)资助。

作者简介: 施羿(1990-), 男, 现任职于汕头大学工学院, 讲师。主要从事分布式光纤传感技术、智能分类算法和深度卷积神经网络等方向的研究。负责国家自然科学基金 1 项, 汕头大学科研启动项目 1 项。



而对光相位的变化非常敏感, 可以用于探测动态过程, 如振动信号和声信号等。 Φ -OTDR 根据散射光光强的变化, 可在数千米至数十千米的范围内对振源进行米级精度的定位。目前, Φ -OTDR 在周界安防、油气管道安全预警、火车追踪与定位和结构健康监测等领域展开了广泛的应用^[2-9]。

Φ -OTDR 中通过向光纤中注入光脉冲产生背向瑞利散射光, 但由于光脉冲具有一定宽度, 因此 Φ -OTDR 的空间分辨能力受到限制, 一般将光脉冲宽度一半所对应的空间距离称为 Φ -OTDR 的空间分辨率(SR)。在管道预警、结构健康监测等领域, 时常会出现多个振动事件同时发生的情况, 且各个振动源之间的距离可能相距较远, 也可能相距很近, 甚至小于 SR。当

2 个振源的间距小于 SR 时, Φ -OTDR 系统无法分别对它们定位。因此, 需要提高 Φ -OTDR 的空间分辨能力 (即降低 SR), 其方法则是使用更窄的探测脉冲。Rao Y J 等人提出了一种基于 Φ -OTDR 的长距离入侵探测系统, 其使用 100 ns 的光脉冲, 获得了 10 m 的 SR^[10]。Murray Matthew J 等人则在多模光纤中使用 20 ns 的光脉冲, 得到了 2 m 的 SR^[11]。但是, 受到光调制器件性能的限制 (一般为声光调制器、半导体调制器或电光调制器), 光脉冲的上升沿和下降沿均为数纳秒, 因此通过常规手段难以获得更窄的光脉冲。此外, 光脉冲的宽度决定了注入光纤中光能量的大小, 并决定了散射光的强度。随着光脉冲在光纤中传播, 散射光强将越来越弱, 并最终淹没在背景噪声之中。因此, 光脉冲宽度与 Φ -OTDR 的有效传感距离成正比关系, 使用更窄的光脉冲将降低 Φ -OTDR 的有效传感距离。

为了在一定的脉冲宽度下实现对临近双振源的分别定位, 本文对临近双振源条件下的 Φ -OTDR 检测信号进行建模和分析。

1 临近双振源条件下 Φ -OTDR 模型

由于光纤制造时的重力和环境的影响, 光纤中不同位置的折射率存在微小差别, 从而在光纤中形成了许多散射单元。当探测脉冲光通过时, 激发出背向瑞利散射光, 并在光纤首端形成干涉, 形成随距离变化的 Φ -OTDR 检测信号^[12], 散射光场强 E 可表示为:

$$E(z_M) = E_0 \sum_{k=M-N}^M e_k \exp(j(\omega t - K \times z_k + \varphi_k)) \quad (1)$$

其中, t 为光传播时间, j 为虚数单位, z 表示距离首端的距离, M 表示 z_M 处为第 M 个散射单元, N 为区间 $[z_M - SR, z_M]$ 内的散射单元个数, e_k 和 φ_k 分别表示第 k 个散射单元的反射系数 (包含传播衰减) 和相位变化, K 和 ω 分别表示探测光的波数和角频率, E_0 表示探测脉冲光的幅值。当 z_{M_1} 处出现振动事件时, 根据散射光是否受到振动影响, 相干瑞利散射光为 2 个部分之和, 可表示为:

$$E(z_M) = E_0 \sum_{k=M-N}^{M_1} e_k \exp(j(\omega t - K \times z_k + \varphi_k)) + E_0 \sum_{k=M_1+1}^M e_k \exp(j(\omega t - K \times z_k + \varphi_k + \theta(t))) \quad (2)$$

其中, $\theta(t)$ 表示由振动引起的光相位变化。

从式 (2) 可知, z_{M_1} 处的振动将在散射迹线中的一

个空间区间 $[z_{M_1}, z_{M_1} + SR]$ 内产生影响, 该区间称为影响区间。 M_1 和 M_2 分别是反射点位置的标记序号。

当在 z_{M_1} 和 z_{M_2} ($z_{M_2} > z_{M_1}$ 且 $z_{M_2} - z_{M_1} < SR$) 2 个位置均出现振动时, 相干瑞利散射光可分为 3 种情况表示: ① 仅受 z_{M_1} 处振动影响; ② 部分仅受 z_{M_1} 处振动影响, 部分均受 z_{M_1} 和 z_{M_2} 处振动影响; ③ 全部受到 z_{M_1} 处振动影响, 部分还受到 z_{M_2} 处振动影响。3 种情况下的 Φ -OTDR 信号表示为:

$$E(z_M) = \begin{cases} A_{M, M_1} \exp(j(\omega t - \Psi_{M, M_1})) + A_{M_1+1, M+N} \exp(j(\omega t + \Psi_{M_1+1, M+N} + \theta_1)), \\ z_{M_1} < z_M < z_{M_2}; \\ A_{M, M_1} \exp(j(\omega t + \Psi_{M, M_1})) + A_{M_1+1, M_2} \exp(j(\omega t + \Psi_{M_1+1, M_2} + \theta_1)) + A_{M_2+1, M+N} \exp(j(\omega t + \Psi_{M_2+1, M+N} + \theta_1 + \theta_2)), \\ z_{M_2} < z_M < z_{M_1} + SR; \\ A_{M, M_2} \exp(j(\omega t + \Psi_{M, M_2} + \theta_1)) + A_{M_2+1, M+N} \exp(j(\omega t + \Psi_{M_2+1, M+N} + \theta_1 + \theta_2)), \\ z_{M_1} + SR < z_M < z_{M_2} + SR \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\theta_1(t)$ 为 z_{M_1} 处振动引起的光相位变化, $\theta_2(t)$ 为 z_{M_2} 处振动引起的光相位变化, 且

$$A_{K, L} = E_0 \left(\sum_{k=K}^L e_k \cos(\varphi_k - K \times z_k) \right)^2 + \left(\sum_{k=K}^L e_k \sin(\varphi_k - K \times z_k) \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Psi_{K, L} = \arctan \left(\frac{\sum_{k=K}^L e_k \sin(\varphi_k - K \times z_k)}{\sum_{k=K}^L e_k \cos(\varphi_k - K \times z_k)} \right) \quad (5)$$

光强是光幅值的平方, 得到 3 种情况下光强信号中的交流变化分量分别是

$$I_1(z_M) = 2A_{M, M_1} A_{M_1+1, M+N} \cos(\theta_1 + \Psi_{M_1+1, M+N} - \Psi_{M, M_1}), \quad z_{M_1} < z_M < z_{M_2} \quad (6)$$

$$I_2(z_M) = 2A_{M, M_1} A_{M_1+1, M_2} \cos(\theta_1 + \Psi_{M_1+1, M_2} - \Psi_{M, M_1}) + 2A_{M, M_1} A_{M_2+1, M+N} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \Psi_{M_2+1, M+N} - \Psi_{M, M_1}), \quad z_{M_2} < z_M < z_{M_1} + SR \quad (7)$$

$$I_3(z_M) = 2A_{M, M_2} A_{M_2+1, M+N} \cos(\theta_2 + \Psi_{M_2+1, M+N} - \Psi_{M, M_2}), \quad z_{M_1} + SR < z_M < z_{M_2} + SR \quad (8)$$

从式(6)~式(8)可知, $I_1(z_M)$ 仅和 z_{M_1} 处的振动有关,且其起始位置为第一个振源的位置; $I_2(z_M)$ 与 z_{M_1} 和 z_{M_2} 处的振动均有关,且其起始位置为第二个振源的位置; $I_3(z_M)$ 仅和 z_{M_2} 处的振动有关。若能获得上述3部分光强所对应的空间位置,即能分别对2个振源进行分别定位。考虑到 θ_1 和 θ_2 均是由外界振动导致的相位变化,其变化速率较快,而 $A_{K,L}$ 和 $\Psi_{K,L}$ 分别是由散射单元决定的幅值和相位,在理想条件下为固定值(其中, K 和 L 用于表示求和的上限和下限)。但是,在实际情况下由于环境影响和激光器频率漂移, $A_{K,L}$ 和 $\Psi_{K,L}$ 将发生小幅度的缓慢变化,但变化速率很低,仅数赫兹。由此可见,散射光强的频率成分由振动导致的相位变化速率决定。

假设外界振动可表示为余弦形式,如 $\theta(t) = D \times \cos(\omega_p t)$, 其中 D 和 ω_p 为散射单元感受到的振动的幅值和角频率,则式 $\cos(\theta(t) + \varphi)$ 可通过贝塞尔公式展开为^[13]:

$$\cos(\theta(t) + \varphi) = \left[J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(D) \cos 2k\omega_p t \right] \cos \varphi - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} J_{2k-1}(D) \cos [(2k-1)\omega_p t] \sin \varphi \quad (9)$$

其中, J_n 为第 n 阶贝塞尔函数。

式(9)表明: $\cos(\theta(t) + \varphi)$ 包含且仅包含 $\theta(t)$ 的基频和倍频,且第 n 个倍频的分量大小和对应阶数的贝塞尔函数值 $J_n(D)$ 有关。当 D 值较小时,如 $D < 3.7$, 此时各阶贝塞尔函数均呈现单调递增状态。由于单个散射单元尺寸微小,其受到的相位变化有限,满足上述微小幅值条件,因此在相干瑞利散射信号中,可认为各阶贝塞尔函数均为单调递增。

双临近振源下散射光频率成分的分析分为以下2种情况:

①当2个振源包含的频率不相同(且不成倍数)时,即 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 频率不同时,相干瑞利散射光中 $I_1(z_M)$ 和 $I_2(z_M)$ 也将具有不同的频率分量。因此,通过分析特征频率以及其倍频在空间中的分布将可得到 $I_1(z_M)$ 和 $I_2(z_M)$ 在空间中的分布情况,进而对2个振源分别定位。

②当2个振源包含相同的频率(或成倍数)时, $I_1(z_M)$ 中的 $\cos(\theta_1 + \varphi)$ 项和 $I_2(z_M)$ 中的 $\cos(\theta_2 + \varphi)$ 项具有相同的频率分量。但此时由于求和项 $\theta_1 + \theta_2$ 的幅值大于 θ_2 和 θ_1 , 且贝塞尔函数为单调递增, $I_2(z_M)$ 中的 $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \varphi)$ 成分将产生更多、更高阶的谐波成份。

因此,通过检测高次谐波在空间中的分布情况,可以得到 $I_1(z_M)$ 和 $I_2(z_M)$ 在空间中的分布情况,进而对2个振源分别定位。

2 基于双谱边际谱的谐波提取

当自变量较小时,贝塞尔函数值随着阶数的增加而降低。为了更清晰地获得 Φ -OTDR 信号中的高次谐波,本文提出一种基于双谱边际谱的谐波分析方法。双谱分析是一种高阶谱分析方法,是时序信号三阶统计量的频谱,其对加性白噪声有很强的抑制能力,并且对高次谐波分量非常敏感^[14],非常适合用于 Φ -OTDR 信号的谐波分析。

假设时序信号为 $x(t)$,其三阶累积量为:

$$R_{xx}(\tau_1, \tau_2) = E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)] \quad (10)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示取均值。其双谱 B_x 为:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau_1, \tau_2) \exp[-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)] \\ = H(\omega_1)H(\omega_2)H(\omega_1 + \omega_2) \quad (11)$$

其中, $H(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} x(\tau) \exp(-j\omega\tau)$, 为 $x(t)$ 的傅里叶变换。

双谱分析中常用双谱切片法于分析信号的二倍频情况,而在根据第1节内容中对模型的分析,需要获得 Φ -OTDR 信号中的更高次谐波情况,因此本文提出的双谱边际谱 $M(\omega)$ 定义为:

$$M(\omega) = \sum_{\omega_1=0}^{\omega} B_x(\omega_1, \omega - \omega_1) \quad (12)$$

通过双谱边际谱的定义可知,高次谐波成分被组成成份中的低次谐波成分所加强,变得更为显著和易于提取。

假设第 i 次脉冲探测过程获得的瑞利散射迹线为 T_i , 则1 s内获得的 Φ -OTDR 信号矩阵形式可表示为:

$$P = (T_1, T_2, \dots, T_s)^T \quad (13)$$

其中, s 为1 s内脉冲发射次数。

对信号矩阵各列取双谱边际谱,得到双谱边际谱在空间中的分布为:

$$O = (M_1, M_2, \dots, M_Q) \quad (14)$$

其中, Q 为每条瑞利散射迹线的采样点数。

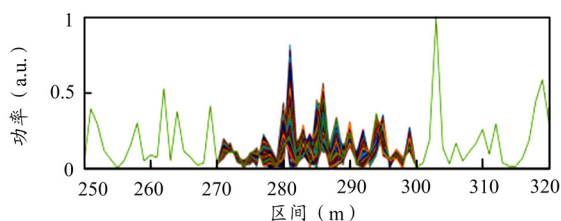
3 仿真实验

本文使用第1节内容中的 Φ -OTDR 模型计算仿真数据测试双谱边际谱法。光源中心波长为 1550 nm,

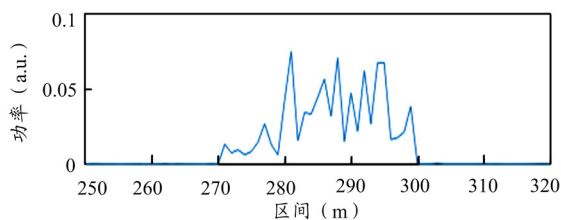
探测脉冲宽度为 200 ns,对应 SR 为 20 m,脉冲重复频率为 1 kHz。振源扰动形式为余弦函数 $\theta(t)=(2\pi ft)$,2 个振源分别设置在 270 m 和 280 m 处。

3.1 不同频率振源仿真测试

将 270 m 处的振源设置振动频率为 13 Hz,280 m 处的振源设置为 43 Hz。200 条原始相干瑞利散射迹线和移动差分算法的处理结果如图 1 所示^[15]。可以看出,2 个振源的扰动使得区间 [270 m,300 m] 内的相干瑞利散射光光强出现了变化,但无法更细节地分辨 2 个振源各自的位置。对 275 m 处的时域信号和 285 m 处的时域信号分别做双谱分析,得到结果如图 2 所示。可以看出,在 275 m 位置,仅有少量的频率耦合点,如 13 Hz 和 26 Hz 之间的相互耦合,表明该位置仅受到一个振源影响,属于 I_1 分量。在 285 m 位置,频率耦合变得更为丰富,是由 2 个振源的影响区间交叉导致的,因此该位置属于 I_2 分量。对所有空间位置分别取双谱边际谱,得到双谱边际谱随空间的变化情况如图 3 所示。可以看出明显的 3 组空间分布:①区间 [270 m,280 m] 中,频率分布为呈现一种简单模式,对

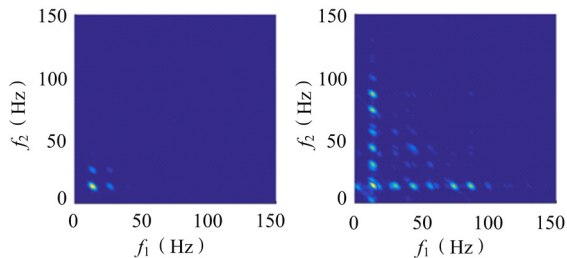


(a) 原始相干瑞利散射迹线



(b) 传统的移动差分算法的处理结果

图 1 200 条原始迹线和移动差分处理结果



(a) 275 m 处

(b) 285 m 处

图 2 时域信号双谱

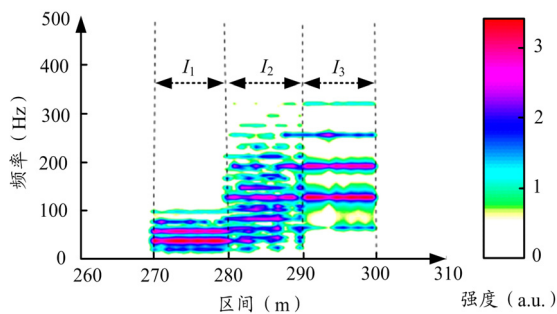


图 3 双谱边际谱在空间中的分布情况(不同频率振源)

应于 Φ -OTDR 模型中的 I_1 ;②区间 [280 m,290 m] 中,频率分布变得更为复杂,这是由于 2 个振源的影响区间互相重叠到导致的,对应于 Φ -OTDR 模型中的 I_2 ;③区间 [290 m,300 m],频率分布变为相对简单的模式,对应于 Φ -OTDR 模型中的 I_3 。与 Φ -OTDR 模型对比可知, I_1 和 I_2 的首端位置即为 2 个振源的位置,即 2 个振源分别处于 270 m 和 280 m 处。

3.2 相同频率振源仿真测试

同频率双振源测试中,2 个振源均被设置为 $\theta(t)=\cos(2\pi f_1 t)+\cos(2\pi f_2 t)$ 的形式,其中 $f_1=7$ Hz, $f_2=43$ Hz,仍然设置在 270 m 处和 280 m 处,其它参数同 3.1 节。对所得的 Φ -OTDR 数据矩阵取双谱边际谱,得到结果如图 4 所示。可以看出,在区间 [270 m,280 m] 和区间 [290 m,300 m] 内,频率分量呈现一种模式,且谐波成分多在 300 Hz 以下,对应于 Φ -OTDR 模型中的 I_1 和 I_3 ;区间 [280 m,290 m] 中,频率分布变得更为复杂且谐波成分明显增加,可知该区域对应于 Φ -OTDR 模型中的 I_2 。因此,由双谱边际谱可知该区域内的 2 个振源分别在 270 m 处和 280 m 处。

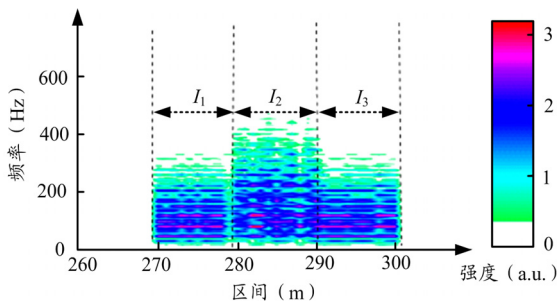


图 4 双谱边际谱在空间中的分布情况(相同频率振源)

4 实验验证

为了进一步验证双谱边际谱法的有效性,本文使用自制的 Φ -OTDR 系统进行了验证实验。实验系统如图 5 所示。其中,激光器为窄线宽激光器,线宽 3 kHz。输出光经声光调制器(AOM)调制为脉冲光后再经由

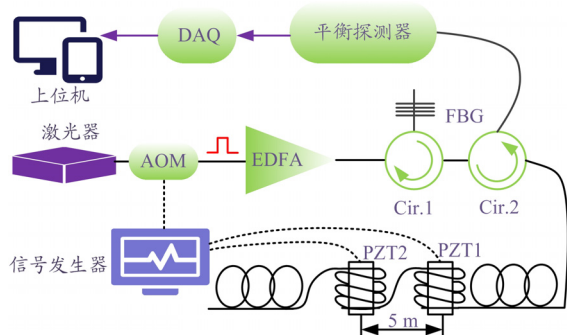


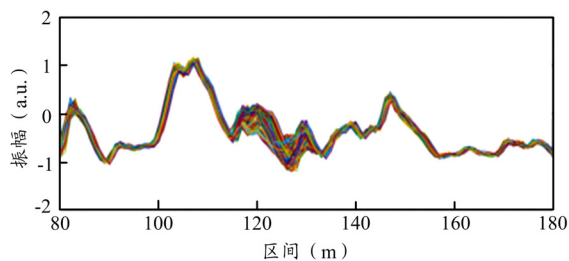
图5 实验系统结构

掺铒光纤放大器(EDFA)提升峰值功率。其后通过环形器1(Cir.1)接布喇格光栅(FBG)滤除EDFA的自发辐射噪声(ASE)。所用测试光纤为单模G.652通信光纤裸纤,长1 km。背向相干瑞利散射光被平衡探测器转化为电信号,经由采集卡(DAQ)采集送入上位机。实验中采用2个压电陶瓷管(PZT)来模拟双振源,PZT管由信号发生器的电压信号驱动。实验时,将PZT管放置在距离光纤首端约120 m的位置附近,将约20 cm长的光纤拉紧缠绕并黏贴于PZT管外表面,2个PZT管之间保留5 m长的光纤,驱动电压设置为5V_{p-p}。经激光多普勒仪测定,此时PZT管的收缩与扩张将在PZT管外表面产生约0.5 $\mu\epsilon$ 的应变增量。

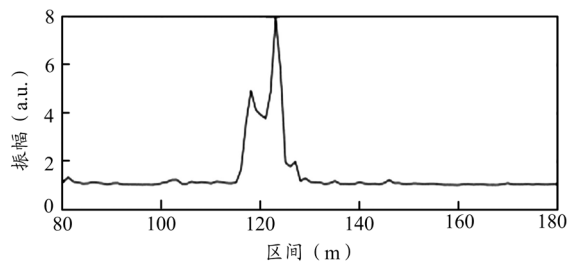
本文首先使用不同的驱动频率分别驱动2个PZT管。其中PZT1的驱动频率设置为11 kHz,PZT2的驱动频率设置为7 kHz。探测脉冲宽度设置为200 ns,对应20 m的SR,重复频率为40 kHz。200条所获得的相干瑞利散射迹线在80~180 m处的情况以及传统的移动差分算法定位结果如图6所示。可以看到在120 m附近出现了振动,但无法更精确地分别得到2个振源的位置。对 Φ -OTDR信号矩阵作双谱边际谱,得到双谱边际谱随空间的分布情况,如图7所示。图7显示区域可分为3个区间:①区间[116 m,121 m]中,仅包含 1.1×10^4 Hz和 1.8×10^4 Hz分量,对应于 I_1 ;②区间[121 m,136 m]中,包含有 0.7×10^4 Hz、 1.1×10^4 Hz、 1.4×10^4 Hz、 1.8×10^4 Hz和 1.9×10^4 Hz等分量,对应于 I_2 ;③区间[136 m,141 m]中,主要包含有 0.7×10^4 Hz、 1.4×10^4 Hz分量,对应于 I_3 。因此,可以定位2个振源位置分别为116 m处和121 m处,相差5 m,与实验设置距离吻合。

接着使用相同频率的驱动信号驱动2个PZT管,驱动频率均为200 Hz。脉冲宽度设置为200 ns,对应20 m的SR,重复频率设置为5 kHz。对获得的 Φ -

OTDR信号矩阵作双谱边际谱,得到双谱边际谱随空间的分布情况,如图8所示。图8显示区域可分为3个区间:①区间[16 m,121 m]中,仅包含200 Hz、400 Hz和600 Hz分量,对应于 I_1 ;②区间[121 m,136 m]中,包含有200 Hz、400 Hz、600 Hz和800 Hz分量,由于激发了更高次的谐波分量,因此该区间对应于 I_2 ;③区间[136 m,141 m]中,包含有



(a) 200条所获得的相干瑞利散射迹线在80~180 m处的情况



(b) 传统的移动差分算法定位结果

图6 200条原始迹线和移动差分处理结果

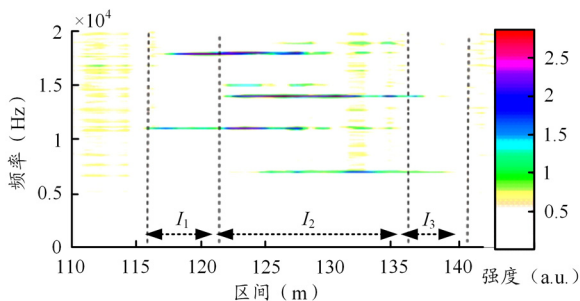


图7 双谱边际谱在空间中的分布情况(不同频率振源)

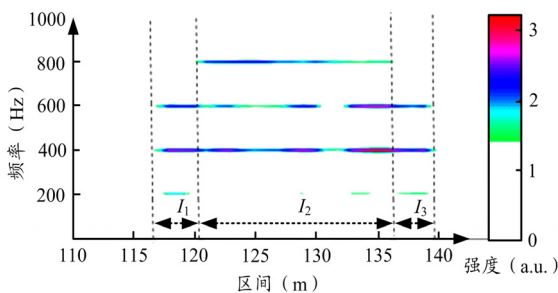


图8 双谱边际谱在空间中的分布情况(相同频率振源)

200 Hz、400 Hz、和 600 Hz 分量,对应于 I_0 。因此,可以定位 2 个振源位置分别为 116 m 处和 121 m 处,相差 5 m,与实验设置距离吻合。

5 结束语

传统的 Φ -OTDR 定位算法无法区分距离小于空间分辨率的 2 个振源。本文通过对双振源条件下 Φ -OTDR 信号特性的研究,提出了一种基于双谱边际谱分析的定位方法,通过分析双谱边际谱在空间中的分布,获得 3 类瑞利散射光在空间中的分布,进而确定临近双振源的各自的具体位置。实验测试表明:该方法在 200 ns 的脉冲条件下可成功将相距 5 m 的 2 个振源分别进行定位,验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] TAYLOR H F, LEE C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing. Compiler: US 5194847 A [P]. 1993-03-16. [2019-10-10]. <http://www.freepatentsonline.com/5194847.html>.
- [2] 梁生,刘腾飞,盛新志,等.基于空间域差分的 Φ -OTDR 光纤分布式扰动传感器定位方法研究[J].红外与激光工程,2016,45(6): 0622005-1-0622005-5.
- [3] 付群健,于森,常天英,等.相位敏感光时域反射系统模式识别方法综述[J].红外与激光工程,2018,285(7):276-289.
- [4] LV A, JING L. On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on Φ -OTDR [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2018, 273: 134-139.
- [5] MA G M, SHI C, QIN W Q, et al. A Non-Intrusive Electrical Discharge Localization Method for Gas Insulated Line Based on Phase-Sensitive OTDR and Michelson Interferometer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019(99): 1-1.
- [6] JUAREZ J C, MAIER E W, CHOI K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. Journal of lightwave technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [7] MASOUDI A, BELAL M, NEWSON T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204-1-085204-7.
- [8] ZHANG J, ZHENG H, ZHU T, et al. Distributed fiber sparse-wideband vibration sensing by sub-Nyquist additive random sampling [J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2022-2025.
- [9] PENG F, DUAN N, RAO Y J, et al. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [10] RAO Y J, LUO J, RAN Z L, et al. Long-distance fiber-optic Φ -OTDR intrusion sensing system [C]// 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. October 5-7, 2009, Edinburgh, United Kingdom. Edinburgh: International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [11] MURRAY, MATTHEW J, ALLEN DAVIS, BRANDON REDDING. Multimode fiber Φ -OTDR with holographic demodulation [J]. Optics express, 2018, 26(18): 23019-23030.
- [12] LI Q, ZHANG C, LI L, ZHONG X. Localization mechanisms and location methods of the disturbance sensor based on phase-sensitive OTDR[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(9): 2099-2103.
- [13] MUANENDA Y, FARALLI S, OTON C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse Φ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 687-701.
- [14] NIKIAS C L, RAGHUVVEER M R. Bispectrum estimation. A digital signal processing framework [J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(7): 869-891.
- [15] LU Y, ZHU T, CHEN L, BAO X. Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.

审稿专家邀请函

尊敬的各位专家学者:

您好!

《光通信技术》是中国电子科技集团公司主管、中国电子科技集团公司第三十四研究所主办的学术刊物,1977 年创刊。为进一步提高办刊质量,完善和丰富现有审稿专家库,提高审稿质量和效率,现诚邀国内外光通信领域的优秀专家参与我刊的审稿工作,相信您的加入将极大地促进我刊的发展。

我刊的审稿专家遴选条件如下:①具有正高级职称。②精通或擅长光通信技术某一方面或多方面的发展前沿与动态,能对论文给出精准的审读意见。③热爱审稿工作,能按时完成审稿并对所审稿件严格保密。

本刊现采用两种审稿方式(在线审稿系统、邮件审稿),每月结算一次审稿报酬(通过银行转账方式)。如有意成为《光通信技术》审稿专家者,请登录本刊网站下载、填写“审稿专家登记表”,以电子邮件附件形式返回至 E-mail: OPTICAL263@163.com,经编辑部研究讨论通过后,将正式成为本刊的审稿专家。

衷心感谢各位专家学者长期以来对《光通信技术》工作的关心和支持。

《光通信技术》编辑部