

基于 OFDR 光纤振动传感器解调算法的研究及改进

薛慧如,马秀荣,单云龙

(天津理工大学 电气电子工程学院,天津 300384)

摘要:为了解决长距离光频域反射(OFDR)技术在定位扰动位置时由于信噪比降低使得空间分辨率下降的问题,在分析系统数学模型的基础上提出了一种改进的解调方案。该解调方案通过比较振动组与非振动组光纤相同位置处反射信号频谱自相关值的相对大小确定扰动位置。通过对实验数据的解调验证了方案的可行性。

关键词:光频域反射;分布式传感;振动传感;自相关

中图分类号:TN929.11;TN911 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)06-0009-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and improvement of demodulation algorithm based on OFDR optical fiber vibration sensor

XUE Huiru, MA Xiurong, SHAN Yunlong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to solve the problem that the spatial resolution of long-range optical frequency domain reflectance (OFDR) technology decreases due to the reduction of signal-to-noise ratio when locating disturbance position, an improved demodulation scheme is proposed based on the analysis of system mathematical model. The demodulation scheme locates the perturbation position by comparing the spectral auto-correlation values of the reflected signal at the same position of the vibration group and the non-vibration group. The feasibility of the scheme is verified by demodulation of experimental data.

Key words: optical frequency domain reflectometry; distributed sensing; vibration sensing; auto-correlation

0 引言

在各类光纤分布式测量传感中,最基本的方案就是光时域反射(OTDR)技术。它根据光纤中不同位置处瑞利散射或非涅尔反射信号的不同来监测光纤的健康状况,但由于 OTDR 技术存在空间分辨率与动态范围这一对不可调和的矛盾使得其应用受到了一定限制^[1]。光频域反射(OFDR)技术与传统的 OTDR 技术相比有着更高的空间分辨率、动态范围以及灵敏度。尽管有这些优势,OFDR 技术目前在应用于长距离光纤测量和长距离振动传感时仍然存在一定的不足^[2]。

本文针对 OFDR 技术应用于长距离振动传感时,

由于光纤远端信噪比的降低而导致空间分辨率恶化的问题给出了一种解调方案。

1 OFDR 光纤传感系统的基本原理

OFDR 技术是一种基于光纤瑞利散射的相干探测技术,其基本原理与线性调频雷达(FMCW)技术类似,其原理如图 1 所示。可调谐光源发出一束线性波长扫描的信号光,信号光被耦合器分为 2 束:一束光进入被测光纤作为探测光,它在传播过程中由于光纤中瑞利散射或非涅尔反射效应的存在,使一小部分的光信

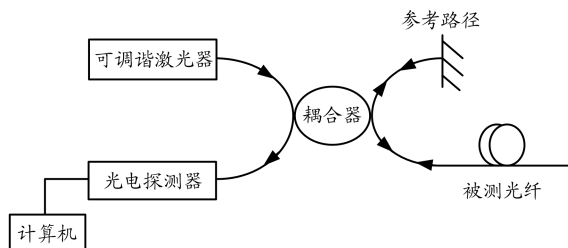


图 1 OFDR 原理图

收稿日期:2018-12-20。

作者简介:薛慧如(1990-),男,山东临沂人,硕士研究生,分别于 2015 年和 2019 年获得通信工程学士学位、硕士学位。主要研究方向为光纤传感,信号处理等。参与 2 项科研项目,新一代移动通信网络覆盖关键技术研发及示范应用和 OFDR 光纤振动传感系统的研究。



号被反射回到耦合器端;另一束光作为本振参考光直接被反射镜反射回到耦合器端。因为 2 束光信号的光程不同,当到达接收端时,其自身携带的频率也不相同,所以会发生拍频干涉,拍频信号的频率与散射位置的距离成正比。最后将接收端信号进行傅里叶变换,就可以得到距离域上的瑞利散射信息。

假设可调谐光源的线性调谐速度为 γ 。本振参考光场 $E_r(t)$ 可以表示为:

$$E_r(t) = E_0 \exp \{ j [2\pi f_0 t + \pi \gamma t^2 + \varphi(t)] \} \quad (1)$$

其中, E_0 为参考光振幅, f_0 为初始频率, $\varphi(t)$ 为 t 时刻光源随机波动的光相位。假设在待测光纤位置 Z_i 处存在反射点, τ_i 为测试光与本振光的时延差 ($\tau_i = 2Z_i n/c$), 设在时延为 τ_i 时的带衰减的反射系数为 $R(\tau_i)$, 若光纤的衰减系数为 α , 折射率为 n , 带衰减的反射系数可以表示为: $R(\tau_i) = r(\tau_i) \exp(-\alpha \tau_i c/n)$, 其中 r 为反射系数, c 为真空中的光速。

在时延 τ_i 处测试光的光场可以表示为:

$$E_s(t, i) = \sqrt{R(\tau_i)} E_0 \exp \{ [j 2\pi f_0 (t - \tau_i) + \pi \gamma (t - \tau_i)^2 + \phi(t - \tau_i)] \} \quad (2)$$

由于瑞利散射系数非常小, 因此本振光与测试光的拍频信号可表示如下:

$$\begin{aligned} I(t) &= |E_r(t) + E_s(t)|^2 \\ &= E_0^2 + E_0^2 \sum_{i=1}^N R(\tau_i) + E_0^2 \sum_{i=1}^N 2\sqrt{R(\tau_i)} \times \\ &\quad \cos \left[2\pi \left(f_0 \tau_i + f_{br} t - \frac{1}{2} \gamma \tau_i^2 + \phi(t) - \phi(t - \tau_i) \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $f_{br} = \gamma \tau_i$ 。

从式(3)可以看出, 光纤中每一个散射点对应于拍频接收信号中的一个单一频率。在对接收信号做快速傅里叶变换(FFT)并利用去斜滤波器算法对光源的非线性相位进行补偿之后^[3], 接收信号的频谱幅度即为光纤瑞利散射的散射系数 $\sqrt{R(\tau_i)}$ 。瑞利散射系数是一幅度符合瑞利分布、相位符合均匀分布的随机过程。当外界有扰动施加于光纤时会引起相应位置处的拍频干涉信号相位的变化。由于调相的作用会导致信号发生变化, 通过比较无扰动时与有扰动时信号的差异即可定位扰动点的位置。

2 改进的 OFDR 光纤振动传感器解调算法

本文所提的解调算法是在 OFDR 光纤振动传感器解调方案上的改进^[4], 即通过比较振动组与非振动

组光纤相同位置处反射信号频谱自相关值的相对大小确定扰动位置。新解调算法原理如下: 当光纤某一位置存在外界振动时, 我们将振动对信号的影响看成信号受到某一频率的正弦调相。

图 2 为外界扰动示意图。假设在光纤的 B 位置处发生外界扰动。可以看到, B 位置之后的散射光信号都将经过该扰动位置, 那么这部分散射信号将受到调相作用; 与之相反的是 B 位置之前的散射光信号, 由于传输路径不经过扰动点, 所以这部分光信号与无振动时保持一致。若 B 点之前有 M_1 个散射点。那么, 前 M_1 个散射点的背向散射信号并未受到扰动位置的相位调制, 第 M_1+1 到最后一个散射点 N 的背向散射信号会受到扰动位置的相位调制, 而前 M 个散射点的拍频信号将保持不变。将式(3)取傅里叶变换, 可以看出变换之后每一频率分量的幅度反映了瑞利散射系数的强弱。因为瑞利散射系数的随机特性, 当我们在振动组与非振动组的频域取一小段数据做互相关运算时, 在振动发生之前的位置将得到一个明显的互相关峰值如图 3 所示; 而在振动位置之后由于扰动的存在互相关峰将会变得杂乱如图 4 所示。此时, 只要我们定义一个阈值来统计相关峰值大于阈值点的个数, 就能定位扰动发生的位置^[5]。

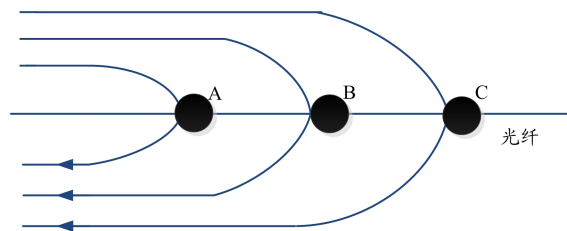


图 2 外界扰动示意图

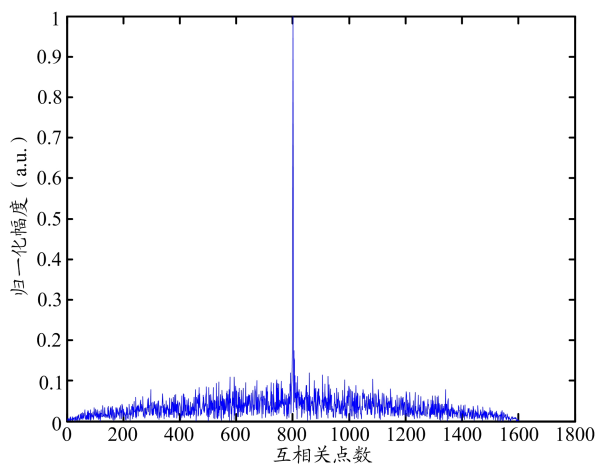


图 3 非振动位置互相关结果

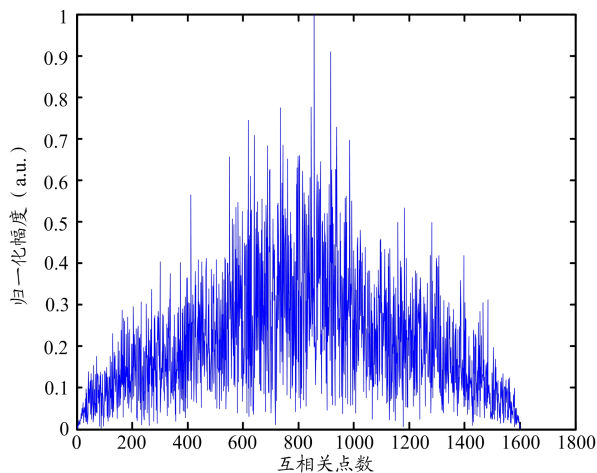


图4 振动位置互相关结果

改进的 OFDR 光纤振动传感器解调算法也是基于上述方法改进而来。由于振动发生后频域第 M 个频点之后的信号幅度都将乘以系数 $J_0(A)$, 根据贝塞尔函数的性质它小于 $1^{[4]}$, 因此利用振动组振动发生位置之后的拍频信号做自相关得到的相关峰值明显低于非振动组相同位置处信号的自相关峰值, 而在其它位置处这 2 个值的大小是相当的。由此本文提出改进的 OFDR 光纤振动传感器解调算法如下:

- ①OFDR 系统运行 2 次得到 2 组拍频信号: 一组是未施加扰动的信号; 另一组为施加扰动的信号。
- ②将 2 组信号进行 FFT 到频域。
- ③取一个滑动窗口从频数数据的开始位置分别选取 2 组频域数据, 并做自相关运算。
- ④比较自相关运算的峰值大小。当两者的比值接近于 1 时, 认为此处是非扰动位置; 当比值发生突变偏离 1 时, 认为此处发生扰动。

3 算法的实验验证

OFDR 分布式振动传感实验结构如图 5 所示^[5]。系统主要由线性调频激光器、干涉仪、偏振控制器、光电探测器以及数据采集装置组成。所用的激光器线宽约为 1kHz, 中心波长为 1550nm, 输出功率为 10mW, 调谐速度为 40GHz/s, 光源调谐范围为 3GHz, 扫描持续时间为 0.075s, 系统采用偏振分极探测技术以减小偏振衰落的影响。数据采集卡的采样速率为 100M/s。辅助干

涉仪的作用是用于估计光源的非线性相位以便用于去斜滤波器算法对非线性相位的消除。辅助干涉仪的长度为 10km。主干干涉仪中被测单模光纤的长度为 92km, 在 91.3km 处放有一个缠绕长度为 12m 的光纤压电陶瓷光纤拉伸器作为扰动源, 压电陶瓷光纤拉伸器施加的波形为三角波, 频率是 0.5kHz。

本文通过实验系统获得 2 组实验数据, 并将它们做 FFT 结果, 如图 6 所示。可以看出, 信号在距离域整体上呈现指数衰减的趋势, 衰减系数为 0.2dB/km。然而, 从小尺度来看, 反射率是杂乱无章的, 符合我们之前所说的瑞利分布特征。应用相关算法来定位扰动点的位置实际上就是比较相应位置上信号的相似程度。系统的空间分辨率取决于所选取的滑动窗口的大小, 之前的算法中所选窗口大小 N 为 350 点, 对应的空间分辨率是 11.6m。当窗口继续变小时因为噪声的影响将使得互相关的结果变得杂乱无法定位扰动位置。

从图 6 中分别选取扰动位置之后与扰动位置之前的数据做自相关运算, 窗口大小为 100, 得到的结果如图 7 所示。可以看出, 2 组数据的峰值大致相当比值为 1.0476, 与 1 非常接近。这是因为在振动发生之前的位置处得到的拍频信号未经相位调制作用还是与之前保持一致, 所以即使是 2 组数据它们经各自做相关运算之后还是会有相似的峰值。

但是在扰动发生位置之后, 由于振动组的信号受到相位调制作用, 它们的频谱幅度被乘以一个小于 1 的系数, 所以在这种情况下 2 组数据再做自相关时, 振动组的峰值将会比非振动组的自相关峰值小很多,

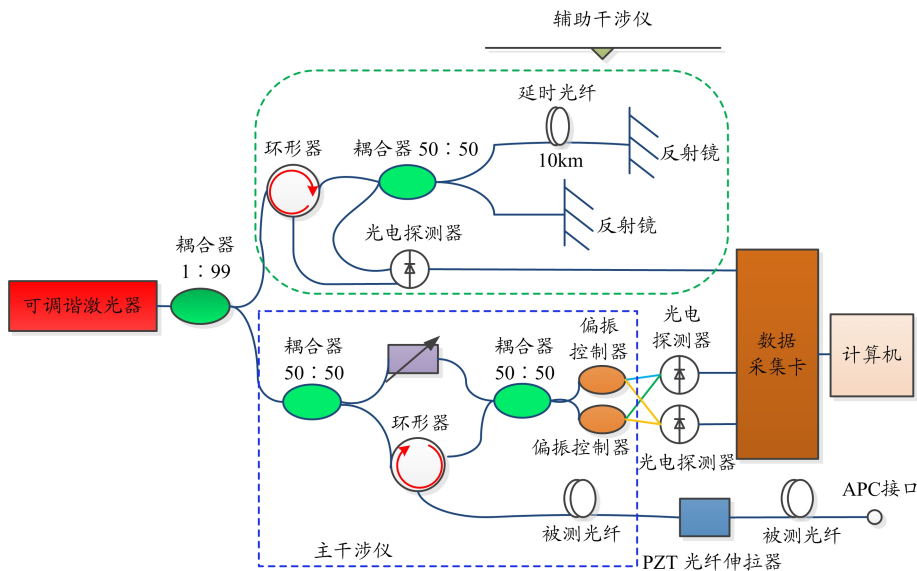


图5 OFDR 分布式振动传感实验结构

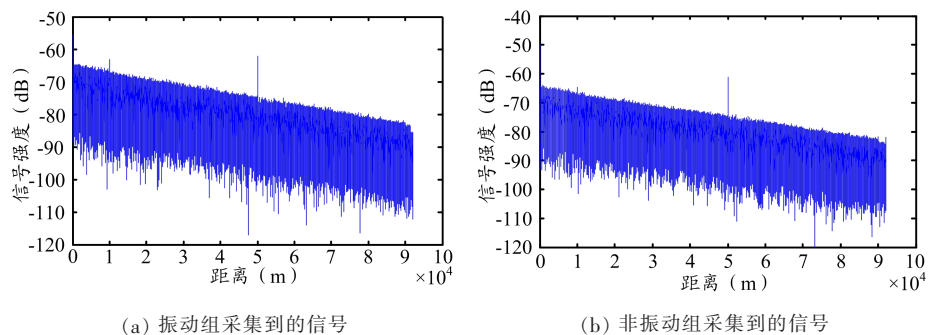


图6 振动组与非振动组的信号幅度谱

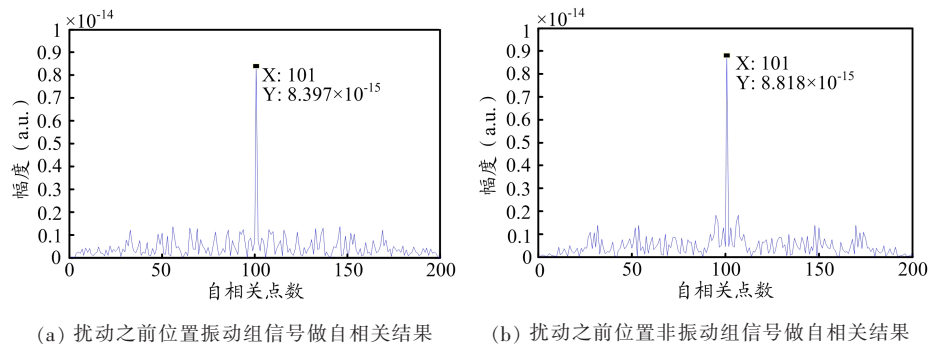


图7 无扰动位置与扰动点之后位置数据自相关结果

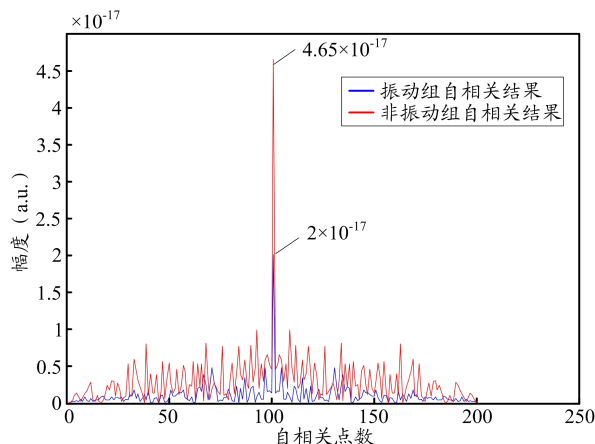


图8 2组数据分别做自相关的结果

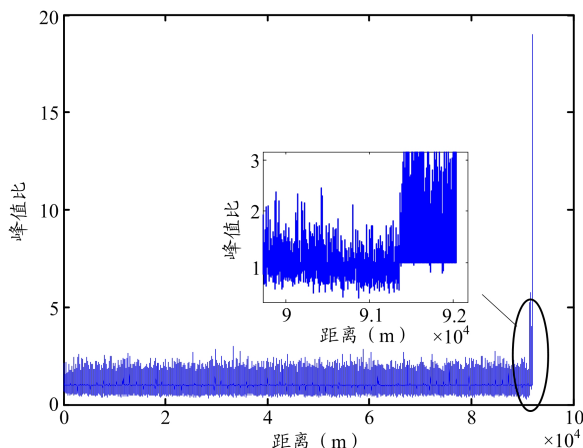


图9 算法解调结果示意图

实验结果如图8所示。2组数据的峰值比为2.325。因此,只要我们从2组数据的初始位置开始用滑动窗选取数据做相关计算,然后比较它们的峰值大小,当比值偏离1时即认定该处为扰动发生的位置。

本文在整个距离域用100点的窗口大小选取数据(对应空间分辨率为3.3m),计算它们的自相关峰值,然后取它们的比值得到整段光纤上距离域数据比值的关系如图9所示。从实验结果可以看出,在扰动发生之前的位置也就是91.3km之前2组数据做自相关的比值在1附近上下浮动,浮动的原因在于系统存在噪声干扰。从图9的子图中可以看出,在91.3km之后数值有了一个明显的提升并且都是大于1,这说明在扰动位置之后振动组数据的自相关值全部比

非振动组的自相关数值要小。由此实现了该扰动位置的定位。

4 结束语

本文介绍了一种改进的OFDR光纤振动传感器解调算法,该算法基于系统数学模型发现振动位置与非振动位置信号频谱幅度的差异来定位扰动位置,最终达到了90km的传感距离,空间分辨率达到了3.3m,并且进行了实验验证,证实了算法的可行性。

参考文献:

- [1] PENG F, WU H, JIA X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804–13810.
- [2] GHAFORI-SHIRAZ H, OKOSHI T. Optical frequency-domain reflectometry[J]. Optical and Quantum Electronics, 1986, 18(4): 265–272.
- [3] DU Y, LIU T, DING Z, et al. Method for Improving Spatial Resolution and Amplitude by Optimized Deskew Filter in Long-Range OFDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1–11.
- [4] ZHENYANG D, X STEVE Y, TIEGEN L, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28319–28329.
- [5] LIU T, DU Y, DING Z, et al. 40km OFDR-based distributed disturbance optical fiber sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 771–774.