

# 基于灰度图像的光纤相干光时域反射计信号处理研究

赵世琦<sup>1,2</sup> 庞拂飞<sup>1,2</sup> 贺梦婷<sup>1,2</sup> 徐 慧<sup>1,2</sup> 王廷云<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

<sup>2</sup>上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

**摘要** 提出了基于灰度图像直方图均衡与梯度法相结合的技术,应用于相干光时域反射计(COTDR)光纤传感信号处理,以COTDR同一光脉冲所探测得到的信号为行向量,以一组光脉冲探测得到的同一空间位置的信号为列向量,构建了相干传感信号的二维灰度图像,通过计算灰度图像的梯度,并结合图像直方图均衡处理,降低了由环境干扰所引入的噪声信号,提高了系统对振动信号的分辨力。采用该技术,基于传感光纤长度为2.5 km的COTDR系统,有效地识别了压电陶瓷所施加的振动信号。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 相干光时域反射计; 直方图均衡; 梯度法

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0305001

## Research on the Signal Processing in Optical Fiber Coherent Optical Time Domain Reflectometer Based on Grey Scale Image

Zhao Shiqi<sup>1,2</sup> Pang Fufei<sup>1,2</sup> He Mengting<sup>1,2</sup> Xu Hui<sup>1,2</sup> Wang Tingyun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optoelectrical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

**Abstract** The technique of combining histogram equalization and gradient method was proposed for the processing of optical fiber sensor signal in a coherent optical time domain reflectometer (COTDR). Treating the signals detected by the same optical pulse sent into the sensor fiber as a row vector, and the signals of the same position detected by a set of optical pulses as a column vector, a two-dimensional grey scale image is built. Through calculating the gradient of the grey scale image, and then histogram equalization, the noise resulted from the environmental interference is depressed. The resolution is improved. With the proposed method, the vibration signal driven by a piezoelectric ceramic transducer in the COTDR with a 2.5 km length sensing optical fiber is identified well.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; coherent optical time domain reflectometer; histogram equalization; gradient method

**OCIS codes** 060.2370; 120.4825; 120.7280

## 1 引 言

相干光时域反射计(COTDR)是一种基于光相干解调的分布式光纤传感技术。利用这种技术可以实现对光纤上所受到的振动扰动信号进行实时检测,在周界入侵监测、油气管道安全监测、测井技术等领域具有重要的应用。

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-22

基金项目: 上海市科委项目(13510500300,14DZ1201403)

作者简介: 赵世琦(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: nbzhaosq@gmail.com

导师简介: 王廷云(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和特种光纤等方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ffpang@shu.edu.cn

早在1984年, Healey<sup>[1]</sup>就提出了相干光时域反射技术的实现原理。1998年, Park等<sup>[2-5]</sup>提出将相干光时域反射技术应用于振动检测并展开研究。相干光时域反射技术将干涉和光时域反射仪(OTDR)两种技术相结合,对沿着传感光纤分布的外界扰动进行监测的同时还能进行空间定位,既可以弥补常规光纤干涉技术(如光纤马赫-曾德尔干涉仪)难于定位的不足,又可以提升OTDR对于动态信号的检测能力,同时也实现了多点振动的检测<sup>[6]</sup>。当外界扰动作用于传感光纤时,受扰动位置的瑞利散射光的光程会发生改变,通过对受扰动区域的瑞利散射随时间发生的变化进行检测和分析,可以辨识出扰动的强度和频率信息。

COTDR需要对连续光进行脉冲调制,由于瑞利散射光的强度相对于原始光信号较小,因此对于整个系统的信噪比有较高要求;同时,为了保证返回的瑞利散射光依然能够发生干涉,对于激光器的线宽(决定激光的相干长度)有较高的要求;对于系统返回的干涉信号,需要以较高的速率对光电转换后的信息进行采集,才能保证信息的完整。随着声光调制器技术的成熟和窄线宽激光器的出现,以及高速数据采集卡成本的降低,使得系统的实现成为了可能。虽然系统的可行性得到了提高,但是如何有效处理COTDR获得的相干信号仍然是一大难题。为了解决这一难题,研究人员尝试引入数字信号处理和图像处理的技术,比如维纳滤波<sup>[7]</sup>和图像增强<sup>[8]</sup>,取得了一定成效。

本文提出将图像信号处理中的直方图均衡与梯度法相结合应用于COTDR系统信号处理,引入该方法的目的在于通过将COTDR系统所记录的曲线中的位置信息与时间信息进行关联,然后从梯度变化的角度来获得传感光纤在时间和空间上所反映的信息变化,从而能有效地增强相干光时域反射计对于相干光信号中的扰动信息的辨析能力更加直观明了,并有利于不同振动区域之间的分辨,实现了对在2.5 km的传感光纤上所施加的压电陶瓷(PZT)振动信号的探测。

## 2 原理分析

### 2.1 COTDR原理

COTDR的相干性主要体现在两方面:1)使用长相干长度的窄线宽激光光源;2)使用相干检测的光探测技术。由于需要将背向散射的瑞利散射光与本地参考光进行干涉,因此,必须使用长相干长度的激光光源,以确保在长距离的光纤传感中可以获得良好的干涉结果。使用相干检测主要体现在使用平衡探测器,如图1所示。背向瑞利散射光与本地光在耦合器中进行干涉后,输入到平衡探测器中,通过平衡探测器可以有效地去除直流干扰,除去直流后的信号经跨阻放大器(TIA)后最终由数据采集卡进行采样。

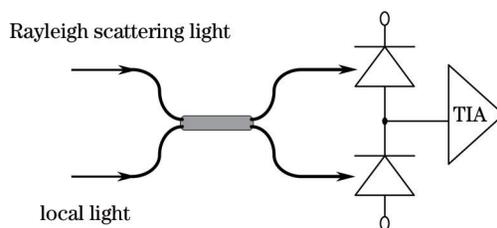


图1 背向散射光与本地光信号相干探测

Fig.1 Coherent detection for the backscattering and local optical signal

背向散射信号光与本地光干涉后经平衡探测器接收所输出的电流为<sup>[9]</sup>

$$C(t) = 4E_R E_{L_0} \cos [\Delta\omega t + \varphi(t)], \quad (1)$$

$$i(t) = \Phi_{L_0}(t) - \Phi_R(t), \quad (2)$$

式中  $E_R$ 、 $\Phi_R$  和  $E_{L_0}$ 、 $\Phi_{L_0}$  分别表示信号光与本振光强度及相位,  $\Delta\omega$  代表拍频信号的频率。

### 2.2 处理相干信号的直方图均衡及梯度法

本文利用数据采集卡直接采集得到光相干信号,这其中包涵了声光调制器产生的200 MHz拍频信号,这不同于通常的混频结合低通滤波滤除拍频信号的方法,直接对含有载波光信号的OTDR曲线作处理,有利于对外界扰动点空间分辨率的提升。但通常所用的滑动平均、差分等处理曲线<sup>[10-12]</sup>的方法都是针对移除拍频后的信号,对于包含拍频的信号,提出将OTDR曲线的位置和时间关系相关联,当作灰度图像来处理,并引入

了图像处理中的梯度法和直方图均衡技术来提高对振动区域的分辨能力。

直方图均衡化是一种常见的用来增加图像的全局对比度的图像增强方法。这种方法将原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布,在增强图像对比度的同时不会改变图像的信息结构。假设一张图像的归一化直方图为

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}, k = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad (3)$$

式中  $n_k$  为灰度级  $r_k$  的像素数目,  $n$  为图像中像素的总数,  $L$  为像素中可能的灰度级总数。对其进行直方图均衡,可表示为

$$s_k = T(r_k) = \sum_{i=0}^k p_r r_i = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n}, (0 \leq r_i \leq 1, i = 0, 1, 2, \dots, L-1), \quad (4)$$

式中  $s_k$  为  $r_k$  进行重新映射后的灰度级。

梯度法是非线性图像锐化的一种方法。通过对图像进行微分处理,表现图像沿某个方向上的灰度变化率。把图像看作二维离散函数,则图像梯度可表示

$$G(x,y) = dx(i,j) + dy(i,j), \quad (5)$$

$$dx(i,j) = I(i+1,j) - I(i,j), \quad (6)$$

$$dy(i,j) = I(i,j+1) - I(i,j), \quad (7)$$

式中  $G(x,y)$  表示梯度,  $dx$  和  $dy$  表示横向和纵向(对应本研究中的位置和时间)的灰度变化,  $I(i,j)$  表示灰度在  $(i,j)$  位置的灰度大小。

在研究过程中,发现通过将梯度法与直方图均衡结合,对于 COTDR 系统的信号处理有很大的帮助。

### 3 实验与分析

#### 3.1 COTDR 实验系统

实验系统如图 2 所示。系统的光源使用线宽为 10 kHz 的窄线宽激光器,输出功率为 7.5 mW。光源输出的连续光通过一个 90:10 耦合器分光,90% 的光作为信号光,输入声光调制器,10% 的光作为本地光。信号光经过声光调制器被调制为脉宽为 20 ns、重复频率为 10 kHz 的脉冲光,同时具有 200 MHz 的拍频,脉冲光经过掺铒光纤放大器(EDFA)和环形器后被注入测试光纤(FUT),在测试光纤中发生瑞利散射后经环形器返回,经过一个 50:50 的耦合器与本地光发生干涉,得到频率为 200 MHz 的拍频信号,干涉后的信号由平衡探测器转换为电信号。得到的电信号由一块采样率为  $10^9 \text{ s}^{-1}$ (Gsp/s)的数据采集卡(DAQ card)采样并转换为数字信号后交由计算机进行处理。测试光纤长 2.5 km。在测试光纤上的 1980 m 处,使用一个 PZT 作为振动源,对其施加一个 100 Hz 的正弦信号来测试系统的探测能力。

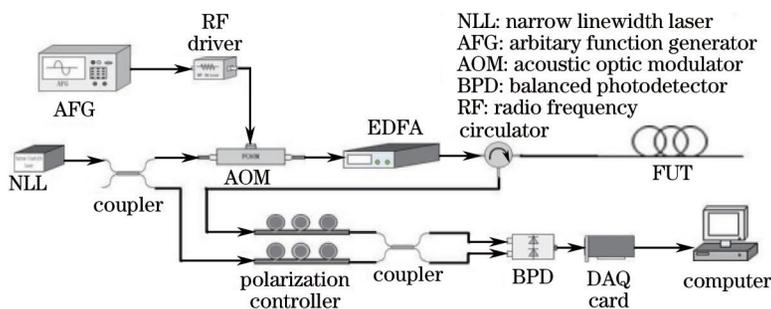


图 2 COTDR 实验装置图

Fig.2 Experimental setup of COTDR

#### 3.2 振动信号检测

将采集得到的信号所含的位置信息和时间信息相关联,以 COTDR 同一光脉冲所探测得到的信号为行向量,以一组光脉冲探测得到的对应同一空间位置的信号为列向量,即将一组 COTDR 曲线按照同步的位置信息对齐后作为灰度图来显示,并将 COTDR 曲线的幅值归一化后映射到 0~255 的范围。本实验选取了其中

500条曲线,可以看到施加振动区域与无振动区域存在略微的区别,将此作为原始图像,如图3(a)所示。然后利用(4)式所示的映射方法对原始图进行直方图均衡,均衡后的结果如图3(b)所示。均衡后图像的灰度级较为均匀地分布到了整个灰度级区间内,较原始图的对比度有了较为明显的提高,均衡前后的图像直方图分别如图4(a)和图4(b)所示。对原始图像还可以运用(5)式所示的梯度法进行图像边缘锐化处理,运用梯度法处理后的图像如图3(c)所示。可以看到振动区域的图像与非振动区域的图像在形态上有着较为明显的差异。观察原始图像与梯度法处理后图像的直方图[图4(a)与图4(c)]可以发现梯度法处理后,图像的灰度级分布按照像素点的梯度大小进行了重新分布。同样地,对梯度法处理后的图像进行直方图均衡处理以提高图像的对比度,直方图均衡后的图像如图3(d)所示,对应的直方图如图4(d)所示。

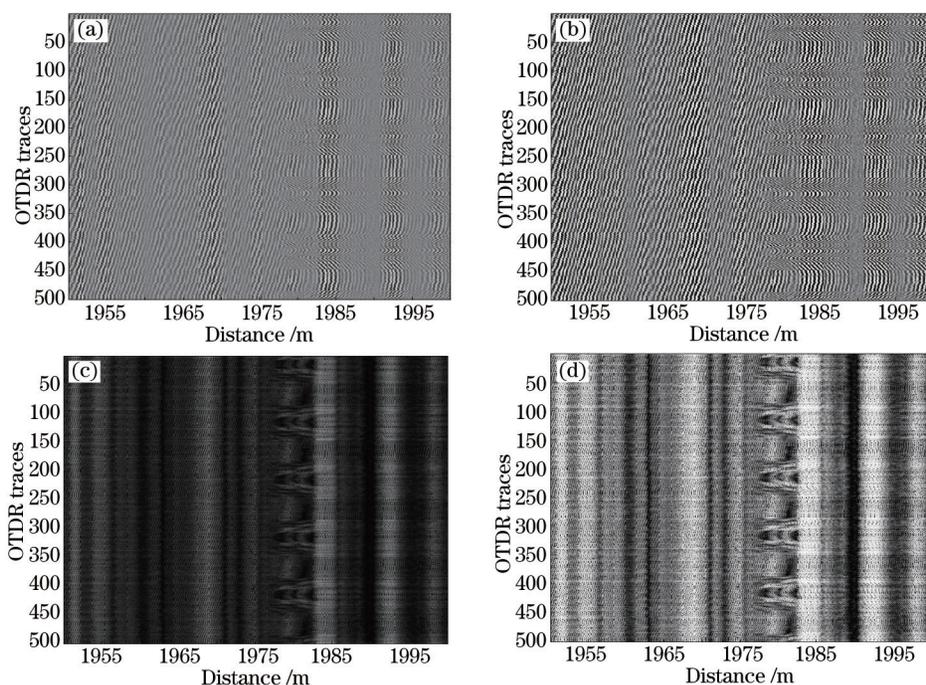


图3 (a) 500条曲线显示的原始图像; (b) 原始图作直方图均衡处理; (c) 原始图像作梯度法处理; (d) 梯度法处理后的图像作直方图均衡处理

Fig.3 (a) Original image shown by 500 traces; (b) processing the original image with histogram equalization; (c) processing the original image with the gradient method; (d) processing the original image with the gradient method and then histogram equalization

在实验的过程中,发现由于PZT对光纤的作用所导致的相位变化对于振动区域之后的传感光纤会有影响[图3(a)中1980 m之后的图像区域],不利于振动区域的分辨。但是通过将图像用梯度法进行处理后,振动区域的边缘被突出了,并且将振动区域之后的光纤所受到的相位干扰消除了。同时,观察综合处理后的图像[图3(d)]可以发现500条OTDR曲线所构成的图像中有5次扰动,根据之前的实验设置,可以推算得到500条OTDR曲线对应50 ms的时间,即扰动的周期为10 ms,与实验中施加的100 Hz信号一致。除此之外,图像梯度法还适用于多点振动同时作用于传感光纤的情况,如图5所示,为施加相距约5 m两个PZT振动源的测量结果,振动频率200 Hz,从处理后的灰度图像上可以有效分辨出两个振动源。

## 4 结 论

提出将直方图均衡和梯度法应用于COTDR的信号处理,提高了系统对于振动区域的分辨能力。通过这种技术,在长为2.5 km的传感光纤上,对位于1980 m处由PZT施加的振动进行了识别。通过将一组OTDR曲线作为灰度图显示的方法来提取振动信息。在综合运用直方图均衡和梯度法后,系统对于振动区域的识别能力的提高,有效消除了振动区域相位变化对于之后的探测点的干扰,能够准确得到外界扰动的频率信息,同时,可以实现对光纤不同位置上的多个振动源进行分辨识别,证明了该技术有利于提高COTDR的振动识别能力和规避外界干扰的能力。

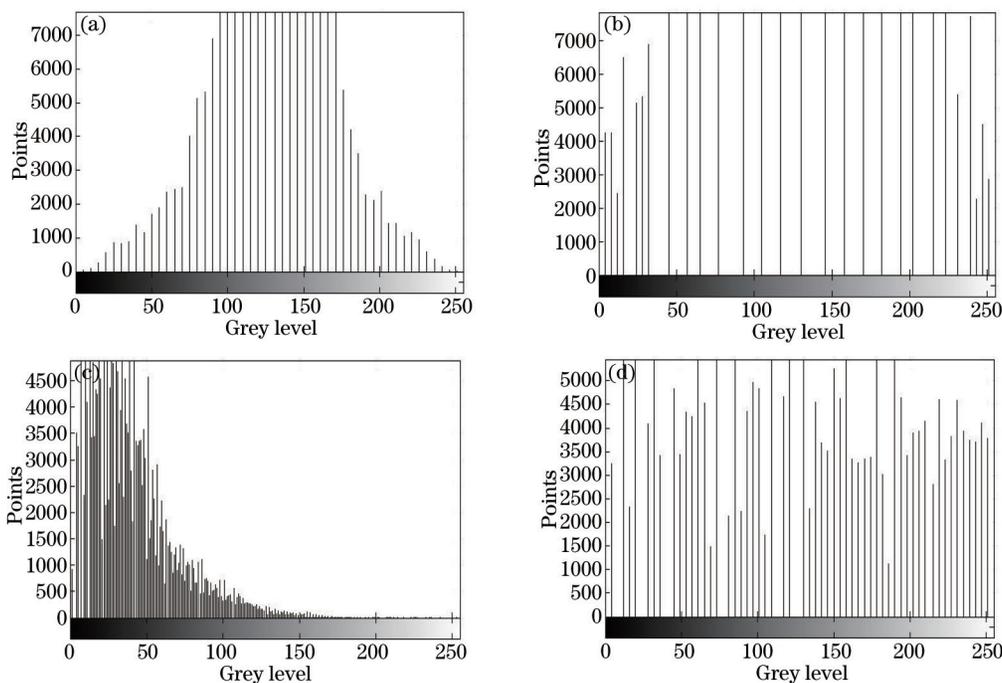


图 4 (a) 图 3(a)的直方图; (b) 图 3(b)的直方图; (c) 图(c)的直方图; (d) 图(d)的直方图

Fig.4 (a) Histogram of Fig.3(a); (b) histogram of Fig.3(b); (c) histogram of Fig.3(c); (d) histogram of Fig.3(d)

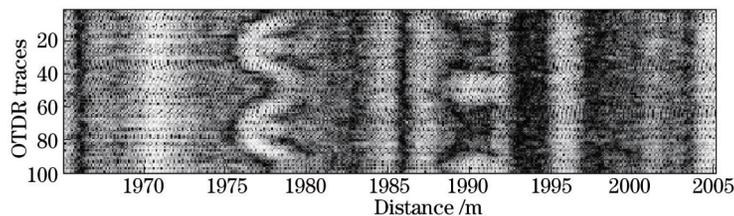


图 5 多点振动分辨

Fig.5 Multi-vibrations identification result

### 参 考 文 献

- 1 P Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electron Lett, 1984, 20(1): 30-32.
- 2 J Park, W Lee, H F Taylor. A fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[C]. SPIE, 1998, 3555: 49-56.
- 3 K N Choies, J C Juarez, H F Taylor. Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters[C]. SPIE, 2003, 5090: 134-141.
- 4 J C Juarez, E W Maier, K N Choi, *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(6): 2081-2087.
- 5 Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, *et al.*. Influences of the frequency drift of the laser on location precision of the phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305003.  
李 勤, 张春熹, 李立京, 等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305003.
- 6 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706005.  
安 阳, 封 皓, 张景川, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706005.
- 7 Liang Kezhen, Pan Zhenqing, Zhou Jun, *et al.*. Multi-parameter vibration detection system based on phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805004.  
梁可桢, 潘政清, 周 俊, 等. 一种基于相位敏感光时域反射计的多参量振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805004.
- 8 T Zhu, X Xiao, Q He, *et al.*. Enhancement of SNR and special resolution in  $\varphi$ -OTDR system by using two-dimensional edge

- detection method[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(17): 2851-2856.
- 9 M G Taylor. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(7): 901-914.
- 10 Y Lu, T Zhu, L Chen, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243-3249.
- 11 Q He, T Zhu, X Xiao, *et al.*. Distributed vibration sensing based on time-difference pulses[C]. SPIE, 2013, 8924: 89241M.
- 12 X Chen, X Zhang, B Yan, *et al.*. Research on coherent Rayleigh backscattering and signal processing method in phase-OTDR[C]. SPIE, 2012, 8421: 8421A3.

栏目编辑: 何卓铭