

## 高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统

赵艳夺<sup>1</sup>, 王目光<sup>1\*</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李东辉<sup>1</sup>, 陈德胜<sup>2</sup>, 黄晓砥<sup>2</sup><sup>1</sup>北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;<sup>2</sup>中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100190

**摘要** 基于频分复用和同相/正交(I/Q)接收技术,提出了一种具有高空间分辨率的大带宽分布式光纤振动传感解调方案,并对其进行了理论分析和数值仿真研究。该分布式振动传感结构包含马赫-曾德尔干涉仪(MZI)与时间门控数字光频域反射仪(TGD-OFDR),其中,MZI输出信号的相位采用零差法解调,用于检测振动信号的频率与幅度;而TGD-OFDR则是通过外差探测技术实现振动信号的定位。数值仿真结果表明,所提系统的可测振动频率上限达兆赫兹量级,4 km传感光纤上的空间分辨率可达0.5 m。该分布式振动传感系统同时具有高空间分辨率与大检测带宽的优势,在民用基础设施健康监测和石油天然气管道泄漏监测等领域具有潜在应用价值。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 分布式振动传感; 时间门控数字光频域反射仪; 光纤干涉仪; 空间分辨率

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1906004

## Distributed Optical Fiber Vibration Sensing System with High Spatial Resolution and Large Bandwidth

Zhao Yanduo<sup>1</sup>, Wang Muguang<sup>1\*</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Li Donghui<sup>1</sup>, Chen Desheng<sup>2</sup>, Huang Xiaodi<sup>2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** By using the two technologies of frequency division multiplexing and in-phase/quadrature (I/Q) receiving, this paper proposes a distributed optical fiber vibration sensing demodulation scheme with high spatial resolution and large bandwidth. Theoretical analysis and numerical simulation are carried out. This distributed vibration sensing structure is composed of a Mach-Zehnder interferometer (MZI) and a time-gated digital optical frequency-domain reflectometry (TGD-OFDR). Specifically, the phase of the MZI output signal is demodulated by the homodyne method to detect the frequency and amplitude of the vibration signal, whereas TGD-OFDR enables the positioning of the vibration signal through heterodyne detection. The numerical simulation results show that the upper limit of the vibration frequency which the proposed system can detect reaches the order of magnitude of MHz, and the spatial resolution on the 4-km sensing optical fiber is up to 0.5 m. This distributed vibration sensing system, with the advantages of high spatial resolution and large detection bandwidth, has application potential in civil infrastructure health monitoring and oil and gas pipeline leakage monitoring.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; distributed vibration sensing; time-gated digital optical frequency-domain reflectometry; optical fiber interferometer; spatial resolution

## 1 引言

近年来,分布式光纤振动传感系统因具有响应速度快、结构简单、抗电磁干扰、传感距离长等优势受到了广泛关注<sup>[1-5]</sup>,在声音信号探测、铁路安全监测、地震

监测、油气管道健康监测等领域具有广阔的应用前景<sup>[6-9]</sup>。一般可以将分布式光纤振动传感系统分成前向干涉型和后向散射型两种<sup>[10]</sup>。其中,基于连续探测光的前向干涉型传感器可以实现很高的振动频率响应,通常可以达到兆赫兹量级<sup>[3,11]</sup>。但是由于连续探测

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-28; 录用日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(U2006217, 61775015)、中央高校基本科研业务费专项资金(2021JBZ103)

通信作者: \*mgwang@bjtu.edu.cn

光中不包含位置信息,所以无法实现振动点的定位。后向散射型的光纤振动传感系统主要是利用脉冲光在光纤中传播时产生的后向瑞利散射实现对外界振动信号的感知,其中基于光纤后向瑞利散射的相位敏感光时域反射仪( $\Phi$ -OTDR)具有多点精确定位的能力,但是 $\Phi$ -OTDR的测量带宽受传感光纤长度的限制<sup>[10]</sup>。除此之外, $\Phi$ -OTDR的脉宽、空间分辨率、信噪比和探测距离之间还会相互制约<sup>[1]</sup>。

油气管道泄漏监测、发动机的振动、桥梁裂缝等领域既需要定位振动,又需要高频响应。为了同时实现振动点的定位与高频振动信号的测量,科研人员提出了将 $\Phi$ -OTDR与干涉仪相结合的方案,即利用 $\Phi$ -OTDR实现振动点的定位,同时光纤干涉仪可实现振动频率的测量。Zhu等<sup>[12]</sup>基于脉冲调制方法将 $\Phi$ -OTDR与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)相结合,在1064 m的传感光纤上实现了3 MHz振动频率的测量和5 m的空间分辨率,但其连续光产生的后向瑞利散射降低了 $\Phi$ -OTDR的信噪比。He等<sup>[13]</sup>基于频分复用技术将MZI与 $\Phi$ -OTDR相结合,在3 km传感光纤上实现了10 m的空间分辨率和最高为40 kHz的频率响应,并且给出了MZI测量的真实频率和 $\Phi$ -OTDR测量的虚假频率之间的数学映射关系。之后又有相关科研人员通过移频镜<sup>[14]</sup>、反馈干涉<sup>[10,15]</sup>和空分复用<sup>[16]</sup>实现了单端测量。这些传感结构的分辨率仍然受到脉冲宽度的限制,通常在米量级甚至十米量级,并且只是基于强度进行频率测量,不能恢复振动波形。Ma等<sup>[17]</sup>基于波分复用技术,通过将MZI与 $\Phi$ -OTDR相结合实现了一种高频振动传感系统,并通过3×3耦合器解调MZI干涉相位,实现振动波形恢复,但空间分辨率只有20 m。

为了提高入射脉冲光的脉宽和系统信噪比,同时保证空间分辨率,Wang等<sup>[18]</sup>提出了时间门控数字光频域反射仪(TGD-OFDR)。TGD-OFDR的空间分辨率只与扫频脉冲的扫频带宽有关,因此在增加脉宽、提高信噪比的同时,还能够实现很高的空间分辨率<sup>[19-21]</sup>,但TGD-OFDR的检测带宽同样受传感光纤长度的限制。为了实现具有高空间分辨率和大检测带宽的分布式光纤振动传感系统,本文提出利用频分复用技术将TGD-OFDR与非平衡MZI相结合的方法。其中外差

探测的TGD-OFDR在增加脉宽、提高信噪比的同时,还可以通过增加扫频带宽实现亚米量级的空间分辨率,而零差探测的MZI可以实现高频振动信号的测量。最后通过I/Q接收获得两路相位差为90°的信号,利用I和Q两路信号进行相位解调,同时解调振动的频率与幅度,并恢复振动波形,这样可弥补传统 $\Phi$ -OTDR与干涉仪相结合传感方案空间分辨率低且仅能解调频率的不足。

## 2 基本原理

### 2.1 系统结构

所提出的分布式振动传感系统结构如图1所示,将波长 $\lambda = 1550$  nm、线宽为1 kHz的窄线宽激光器作为系统光源,激光器输出光经过1:8:1光纤耦合器分成三路。其中:10%的光入射到第一路,作为非平衡MZI结构的连续探测光,光隔离器(ISO)用于防止高功率的探测脉冲反射回光源并对其进行损伤;80%的光入射到第二路,第二路光信号经过I/Q调制器被调制成线性啁啾脉冲光,任意波形发生器(AWG)用于产生两路相位差为90°的线性啁啾脉冲,以驱动I/Q调制器。I/Q调制器由一个母马赫-曾德尔调制器(MZM)和两个子MZM组成,能够同时进行相位与强度调制,控制两个子臂的偏置电压工作于最小偏置点,母臂偏置电压工作于正交偏置点,忽略高阶边带后,I/Q调制器只会输出1或者-1阶边带。I/Q调制器具有灵活且调制带宽大的优势,可以灵活添加窗函数并增大扫频带宽,因此在进行匹配滤波处理后可以实现较高的空间分辨率。I/Q调制器生成的线性啁啾脉冲光经过掺铒光纤放大器(EDFA)的放大之后,通过环形器的2端口入射到4 km传感光纤,传感光纤中线性啁啾脉冲光的后向瑞利散射光通过环形器端口3送到I/Q接收机,并与本振光拍频。10%的光入射到第三路充当本振光,其作用是第一路连续探测光形成非平衡MZI,用于真实振动频率与幅度的检测,并与后向瑞利散射信号进行拍频构成TGD-OFDR,用于欠采样状态下虚假振动频率检测和高空间分辨率的振动点定位。光源相干长度远大于传感光纤长度,因此不需要参考光纤就能实现干涉<sup>[14,22]</sup>。I/Q接收机输出I和Q两路相

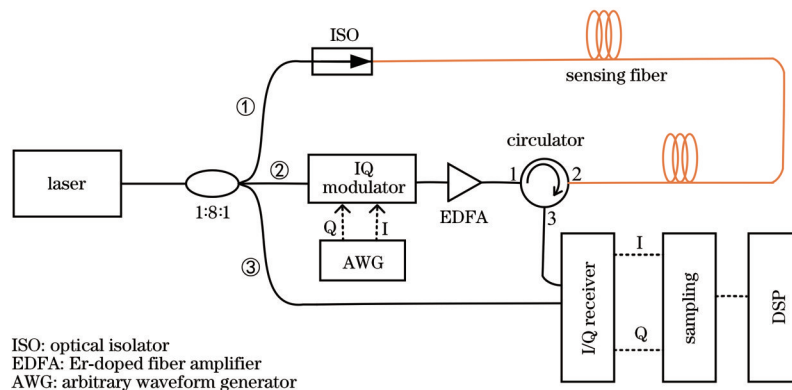


图1 TGD-OFDR与MZI融合的振动传感系统

Fig. 1 Vibration sensing system combined with TGD-OFDR and MZI

位差为  $90^\circ$  的信号用于相位解调, I 和 Q 两路信号经过双通道采集后变成数字信号, 最后通过数字信号处理解调振动引起的相位变化, 从而解调出振动的频率与幅度。

## 2.2 原理分析

激光器的输出光场可表示为

$$E_{\text{PCW}}(t) = \sqrt{P_{\text{PCW}}} \sqrt{\exp(-\alpha L_s)} \exp\left\{j\left[2\pi f(t - \Delta\tau_s) + \theta(t) + \varphi(t - \Delta\tau_s)\right]\right\}, \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{PCW}}$  为经 ISO 后连续探测光的光功率;  $\alpha$  为光纤损耗系数;  $L_s$  为传感光纤的长度;  $\Delta\tau_s = nL_s/c$  为传感光纤导致的时延,  $c$  为真空中的光速,  $n$  为纤芯有效折射率;  $\theta(t)$  为振动导致的相位变化。第二路经 I/Q 调制器调制和 EDFA 放大形成的线性啁啾脉冲光表达式为

$$E_p(t) = s(t) \sqrt{P_p} \exp\left\{j\left[2\pi f t + \varphi(t)\right]\right\}, \quad (3)$$

$$s(t) = \exp\left[j\left(2\pi f_s t + \pi k t^2\right)\right] W(t), \quad (4)$$

式中:  $s(t)$  为 AWG 输出的调制信号;  $P_p$  为经过 EDFA 放大后脉冲光的峰值光功率;  $f_s$  为扫频脉冲的起始频率;  $k$  为频率啁啾速率;  $W(t)$  为窗函数。第三路本振光的表达式为

$$E_{\text{LO}}(t) = \sqrt{P_{\text{LO}}} \exp\left\{j\left[2\pi f t + \varphi(t)\right]\right\}, \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{LO}}$  为本振光的光功率。对本振光与连续探测光在 I/Q 接收机进行零差探测, 产生的 I 和 Q 两路信号的表达式为

$$i_{11}(t) = R \sqrt{P_{\text{LO}}} \sqrt{P_{\text{PCW}}} \sqrt{\exp(-\alpha L_s)} \cos\left[-2\pi f \Delta\tau_s + \theta(t) + \varphi(t - \Delta\tau_s) - \varphi(t)\right], \quad (6)$$

$$i_{1Q}(t) = R \sqrt{P_{\text{LO}}} \sqrt{P_{\text{PCW}}} \sqrt{\exp(-\alpha L_s)} \sin\left[-2\pi f \Delta\tau_s + \theta(t) + \varphi(t - \Delta\tau_s) - \varphi(t)\right], \quad (7)$$

式中:  $R$  为 I/Q 探测器的响应度。对线性啁啾脉冲光导致的后向瑞利散射信号与本振光在 I/Q 接收机进行外差探测, 得到的 I 和 Q 两路信号<sup>[20]</sup>的表达式分别为

$$i_{21}(t) = R \sqrt{P_{\text{LO}}} \sqrt{P_p} \operatorname{Re}\left\{\left[h(t) \otimes s(t)\right] \exp\left[j\varphi(t - \Delta\tau_i) - j\varphi(t)\right]\right\}, \quad (8)$$

$$i_{2Q}(t) = R \sqrt{P_{\text{LO}}} \sqrt{P_p} \operatorname{Im}\left\{\left[h(t) \otimes s(t)\right] \exp\left[j\varphi(t - \Delta\tau_i) - j\varphi(t)\right]\right\}, \quad (9)$$

$$h(t) = \sqrt{\exp\left(-\alpha \frac{c \Delta\tau_i}{n}\right)} \sqrt{\gamma_i} \exp\left[j\left(-2\pi f t\right)\right], \quad (10)$$

式中:  $h(t)$  为光纤的脉冲响应, 其中包含振动信息;  $\otimes$  为卷积符号;  $\gamma_i$  为第  $i$  个散射点的散射率, 下标  $i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) 代表第  $i$  个散射点;  $\Delta\tau_i = 2nL_i/c$  为第  $i$  个散射点到接收端的时延,  $L_i$  为第  $i$  个散射点到传感光纤起始端的距离。最终 I/Q 接收机输出的 I 和 Q 两路信号的表达式为

$$i_i(t) = \eta_i(t) + i_{11}(t) + i_{21}(t), \quad (11)$$

$$E(t) = \sqrt{P} \exp\left\{j\left[2\pi f t + \varphi(t)\right]\right\}, \quad (1)$$

式中:  $P$  和  $f$  分别为激光器的输出光的功率与频率;  $\varphi(t)$  为激光器的相位噪声。第一路连续探测光到达 I/Q 接收机的光场表达式为

$$i_Q(t) = \eta_Q(t) + i_{1Q}(t) + i_{2Q}(t), \quad (12)$$

式中:  $\eta_I(t)$  和  $\eta_Q(t)$  分别为 I 和 Q 两路光电探测器的噪声。

从以上理论分析可以发现:  $i_{11}(t)$  和  $i_{1Q}(t)$  处于基带,  $i_{21}(t)$  和  $i_{2Q}(t)$  处于射频段, 可以通过滤波器将基带信号和射频信号分离, 也就是将 MZI 干涉信号与 TGD-OFDR 信号分离。将分离的  $i_{21}(t)$  和  $i_{2Q}(t)$  进行匹配滤波处理<sup>[16-18]</sup>, 求多条强度曲线的标准差用于振动点定位与空间分辨率的验证。最后分别解调 TGD-OFDR 的差分相位和 MZI 的相位, 进行振动信号的解调。

## 3 仿真实验

### 3.1 系统参数设置

本节将基于第 2 节的理论分析, 在 Matlab 中对系统进行仿真。系统仿真采用光纤一维瑞利散射模型, 如图 2 所示。设置系统采样率  $F_s$  为 2 GSa/s, 采样时间间隔  $T_s = \frac{1}{F_s} = 0.5 \text{ ns}$ 。考虑到计算机的内存有限, 将传感光纤长度设置为 4 km, 实际情况中, 传感光纤可以延长至几十千米。将传感光纤分成长度为  $L = \frac{c T_s}{2n}$  的均匀小段<sup>[23]</sup>, 每个小段中仅包含一个瑞利散射点, 瑞利散射点位置  $\Delta L$  在  $(0, L]$  均匀分布, 纤芯有效折射率  $n = 1.46$ , 光纤损耗系数为 0.2 dB/km, 散射率  $\gamma$  服从均匀分布。忽略 ISO 的插损, 第一路经过 ISO 输出的连续探测光的光功率  $P_{\text{PCW}}$  设置为 0 dBm。第二路经过 EDFA 放大的啁啾脉冲光的峰值光功率  $P_p$  设置为 20 dBm, 脉冲重复频率  $f_r$  为 20 kHz, 即脉冲周期为  $1/20 \text{ kHz} = 0.05 \text{ ms}$ , 脉宽为 5  $\mu\text{s}$ , 起始扫频频率  $f_s$  设置为 100 MHz, 扫频速率  $k$  依次设置为 20 MHz/ $\mu\text{s}$ 、40 MHz/ $\mu\text{s}$ 、60 MHz/ $\mu\text{s}$  和 80 MHz/ $\mu\text{s}$ , 对应的扫频带宽  $B_{\text{sweep}}$  依次为 100 MHz、200 MHz、300 MHz 和 400 MHz, 用于后文分析空间分辨率与扫频带宽的关系。窗函数  $W(t)$  设置为汉宁窗以抑制旁瓣串扰<sup>[24]</sup>。第三路本振光的光功率  $P_{\text{LO}}$  设置为 0 dBm。探测器的响应度  $R$  设置为 0.8 A/W, 系统只考虑激光器相位噪声和探测器引入的散粒噪声, 不考虑偏振态的变化和其余噪声。激光器相位噪声以维纳过程添加, 探测器散粒噪声以高斯白噪声的方式添加<sup>[25]</sup>。

在对 TGD-OFDR 解调时需要对接收到的信号进



图 2 光纤离散化瑞利散射模型

Fig. 2 Discrete Rayleigh scattering model of optical fiber

行匹配滤波和压缩处理,理论空间分辨率由  $R = |s(t) \otimes s^*(-t)|$  的半峰全宽(FWHM)决定。根据上述仿真条件对添加汉宁窗的不同扫频带宽的调制信号  $|s(t) \otimes s^*(-t)|$  进行仿真,其结果如图 3(a)所示,可以看出:随着扫频带宽的增大,  $|s(t) \otimes s^*(-t)|$  的 FWHM 越小,表明空间分辨率越高。100 MHz、200 MHz、300 MHz 和 400 MHz 扫频带宽的啁啾脉冲经过匹配滤波后的 FWHM 依次为 20 ns、9 ns、6 ns 和

5 ns,理论空间分辨率依次为  $L_{SR1} = \frac{c \times 20 \text{ ns}}{2n} = 2 \text{ m}$ 、 $L_{SR2} = \frac{c \times 9 \text{ ns}}{2n} = 0.9 \text{ m}$ 、 $L_{SR3} = \frac{c \times 6 \text{ ns}}{2n} = 0.6 \text{ m}$  和  $L_{SR4} = \frac{c \times 5 \text{ ns}}{2n} = 0.5 \text{ m}$ 。旁瓣抑制比可达 47 dB,能够有效抑制串扰。图 3(b)示出扫频带宽与空间分辨率的关系,从图中可以看出随着扫频带宽的增加,空间分辨率越来越高。

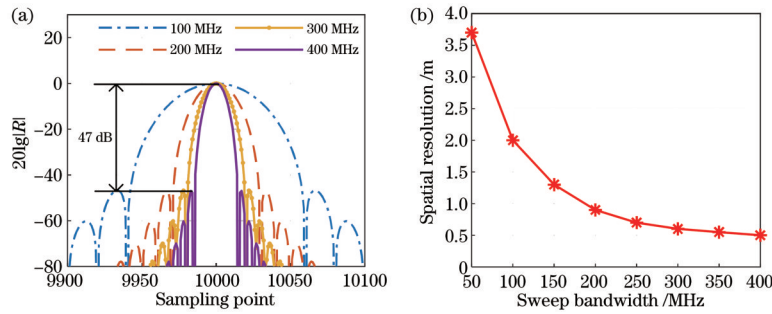


图 3 TGD-OFDR 与 MZI 融合系统的空间分辨率。(a)啁啾脉冲  $s(t)$  匹配滤波后的形状;(b)扫频带宽与空间分辨率的关系

Fig. 3 Spatial resolution of system combining MZI and TGD-OFDR. (a) Shape of chirped pulse  $s(t)$  after matched filtering; (b) relationship between sweep bandwidth and spatial resolution

### 3.2 I/Q 接收机输出信号

为了得到更高空间分辨率,在下文的所有仿真中,结合采样率,将扫频带宽设置为 400 MHz,即理论空间分辨率为 0.5 m。向 4 km 传感光纤中以 0.05 ms 的时间间隔发送了 200 个脉宽为 5  $\mu$ s 的啁啾探测脉冲,实现了 200 次的有效测量,总测量时间为 10 ms,仿真得到 I 和 Q 两路信号的时域波形及 I 路的频谱如图 4 所示。图 4(b)为对图 4(a)虚线框的放大,可以看到时域是探测脉冲的后向瑞利散射信号。从图 4(c)频谱图可以看到  $i_{21}$  的频率范围是 100~500 MHz,与扫频范围一致。图 4(d)为图 4(c)虚线框的放大,低频处是 MZI 的干涉结果。当发生单频振动时,式(6)、(7)可以展开成贝塞尔函数的形式,振幅较大时会出现多个频率峰值。图 4(d)出现的多个频率峰是在 0.5 m 传感光纤上添加振幅为 3  $\mu$  $\epsilon$ 、频率为 500 Hz 的正弦振动引起的。可以分别通过带通滤波和低通滤波分离 TGD-OFDR 和 MZI 信号,然后分别进行解调。

### 3.3 单点振动解调

振动会引起光纤发生轴向应变和折射率的变化,从而进一步影响信号光程与时延。对于散射元来说,振动主要是影响散射元的光程,从而影响光信号返回到光纤起始点的时间。在传感光纤 3844 m 处 0.5 m 长度段的传感光纤上添加一个频率为 500 Hz、应变量为

为 3  $\mu$  $\epsilon$  的单频正弦振动。根据公式<sup>[25]</sup>

$$\phi(\epsilon) = 2\beta(n - n^3 P_e / 2)\epsilon L_{SR} = \frac{\epsilon L_{SR}}{K_\phi}, \quad (13)$$

式中:  $\epsilon$  为应变变量;  $\beta$  为传输常数;  $P_e = 0.22$  为光纤的弹光系数;  $L_{SR} = 0.5 \text{ m}$  为理论空间分辨率; 系数  $K_\phi = 110.37 \text{ n}\epsilon \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ 。根据式(13),相位改变量为 13.59 rad。解调流程如图 5 所示,经通带为 100~500 MHz 的带通滤波器后,匹配滤波解调的 TGD-OFDR 信号强度轨迹  $|r(t)|$  如图 6(a) 所示,可以看到在添加振动的位置强度出现明显波动。图 6(b) 为沿传感光纤强度变化的归一化标准差,其振动点峰值的 FWHM 决定空间分辨率,从图中可以看到 FWHM 为 0.55 m,代表空间分辨率为 0.55 m,这与理论值相符合。图 7(a)、(b) 分别为通过反正切算法解调的 TGD-OFDR 信号和 MZI 信号的相位,振动引起的 TGD-OFDR 和 MZI 的相位变化量分别为 13.59 rad 和 6.80 rad,这与理论值相符。MZI 解调的振动幅度为 TGD-OFDR 的一半,这是因为脉冲光和其引起的后向瑞利散射光往返过程中会两次通过振动点。图 7(c)、(d) 分别为相应的功率谱密度(PSD),从图中可以看出所添加振动的频率为 500 Hz。根据图 6 和图 7 的解调结果,该系统不但可以精确定位振动点发生的位

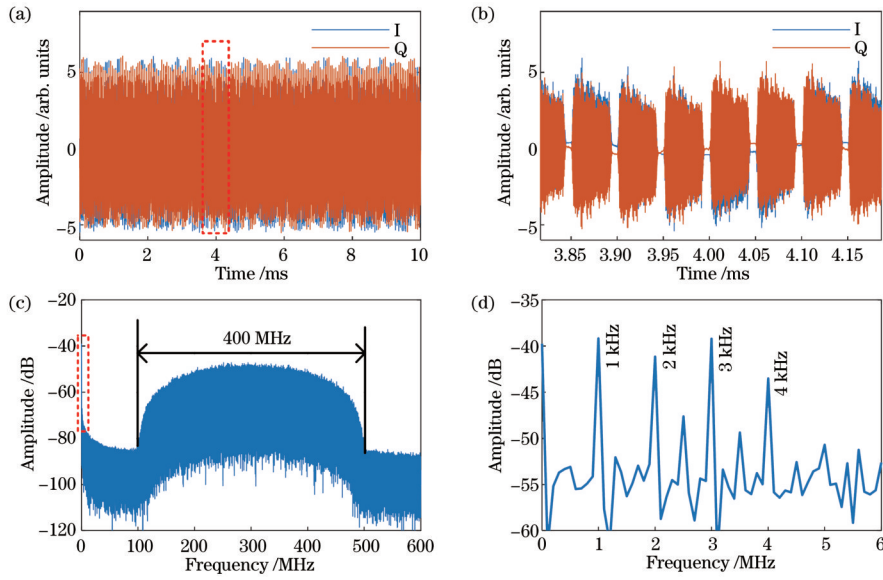


图 4 I/Q接收机接收到的原始信号的时域及其频谱。(a)(b) I/Q接收机的探测时域波形;(c)(d) I路的频谱  
Fig. 4 Time domain waveforms and spectra of original signal received by I/Q receiver. (a) (b) Time domain waveforms detected by I/Q receiver; (c) (d) spectra of channel I

置,而且可以通过解调相位恢复出振动波形。

受限于传感光纤长度, TGD-OFDR的脉冲重复频率 $f_r$ 设置为 20 kHz,根据奈奎斯特采样定理,测量的最大频率为 10 kHz。在传感光纤 3844 m 处 0.5 m 长度段的传感光纤上添加应变幅度为 500  $\mu\epsilon$ ,频率依次为 17 kHz、18 kHz 和 19 kHz 的正弦振动。当振动频率大于 10 kHz 时,经过 TGD-OFDR 解调的频率会被折叠到 10 kHz 以内。真实振动频率与折叠之后的虚假频率<sup>[13]</sup>满足:

$$f_{display} = |f_{real} - mf_r|, m \in \mathbb{Z}, |f_{real} - mf_r| < f_r/2, (14)$$

式中: $f_{display}$ 为折叠之后的虚假频率; $f_{real}$ 为真实振动频率; $m$ 为正整数。根据式(14),在 20 kHz 脉冲重复频率下对 17 kHz、18 kHz 和 19 kHz 的振动信号进行采样,这三个频率的振动信号依次会被折叠到 3 kHz、2 kHz 和 1 kHz。根据式(13),TGD-OFDR 信号的相位变化量为 2.26 rad,而基于 MZI 的解调相位是基于 TGD-OFDR 的 1/2。图 8 所示为通过解调 TGD-OFDR 和 MZI 相位得到的振动信号的 PSD。其中

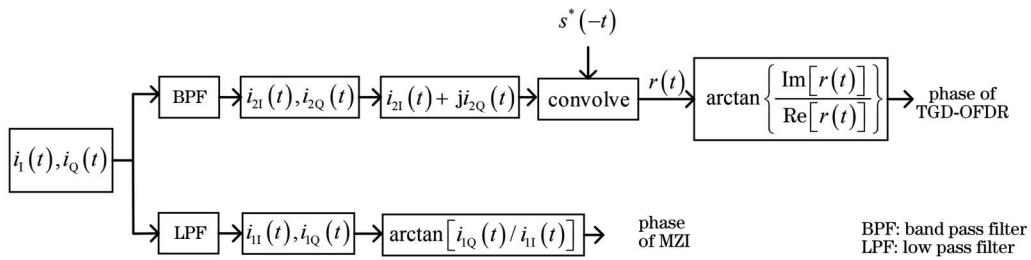


图 5 解调流程框图

Fig. 5 Flow chart of demodulation

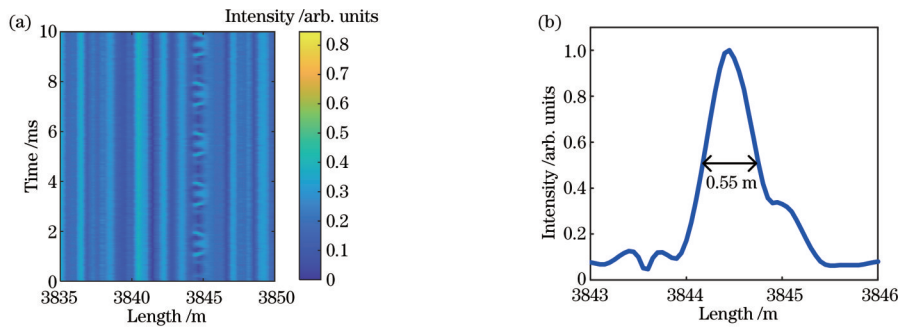


图 6 单点振动定位。(a)强度轨迹;(b)强度的标准差

Fig. 6 Single point vibration location. (a) Intensity trace; (b) standard deviation of intensity

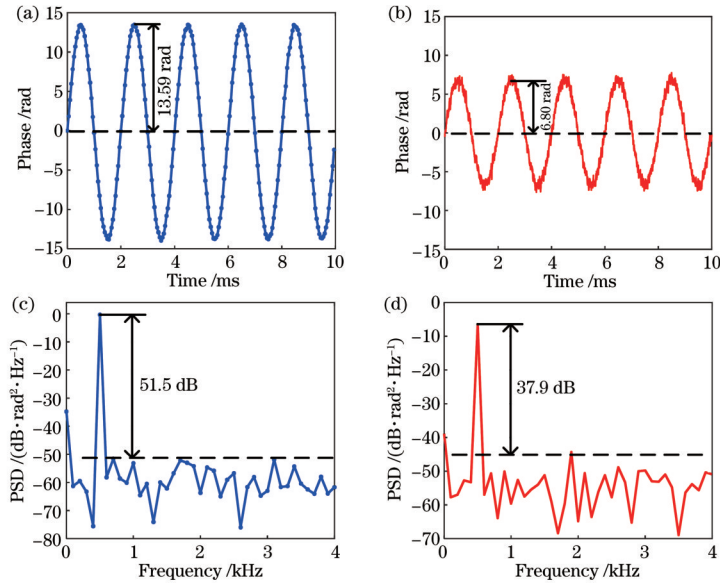


图 7 单点振动相位解调。(a) TGD-OFDR 在振动位置的时域相位解调结果;(b) MZI 时域相位解调结果;(c) 通过解调 TGD-OFDR 相位得到的振动信号 PSD;(d) 通过解调 MZI 相位得到的振动信号 PSD

Fig. 7 Phase demodulation of single point vibration. (a) Time domain phase demodulation results of TGD-OFDR at vibration position; (b) time domain phase demodulation results of MZI; (c) PSD of vibration signal obtained by demodulating TGD-OFDR phase; (d) PSD of vibration signal obtained by demodulating MZI phase

17 kHz、18 kHz 和 19 kHz 的振动信号经 TGD-OFDR 解调后依次被映射到 3 kHz、2 kHz 和 1 kHz, MZI 则可

以实现真实振动频率的解调, 仿真结果与理论结果相一致。

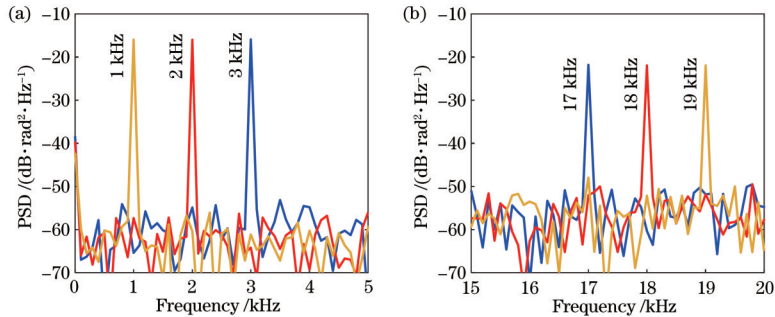


图 8 相位解调的单点高频振动 PSD。(a) 通过解调 TGD-OFDR 相位得到的振动信号的 PSD;(b) 通过解调 MZI 相位得到的振动信号的 PSD

Fig. 8 Single point high frequency vibration PSD of phase demodulation. (a) PSD of vibration signal obtained by demodulating TGD-OFDR phase; (b) PSD of vibration signal obtained by demodulating MZI phase

### 3.4 双点振动解调

分别在传感光纤的 A 点(1447 m)和 B 点(1848 m)处添加高频振动信号, 振动频率分别为 1.001 MHz 和 1.002 MHz, 振动引起的应变大小分别为 500  $\mu\epsilon$  和 1000  $\mu\epsilon$ 。根据式(13), A 点的相位改变量为 2.26 rad, B 点的相位改变量为 4.53 rad。图 9 为通过解调 TGD-OFDR 强度的双点振动定位结果。经过带通滤波器滤出 100~500 MHz 的频带信号后进行匹配滤波处理, 两个振动位置的强度轨迹如图 9(a)、(b) 所示, 振动点处存在清晰的强度变化。图 9(c)、(d) 为 200 条瑞利散射信号振动点处强度的标准差, 由仿真结果可知, 此系统的空间分辨率约为 0.5 m, 相较于  $\Phi$ -OTDR 与干涉仪结合振动传感系统的米甚至十米量级的空间分辨率有

着较大的提升。

确定振动发生的位置之后, 对两点的振动信号进行解调。图 10(a)、(c) 为通过解调 MZI 干涉信号的相位得到的整根传感光纤上发生的所有振动信号波形的叠加及其 PSD。由此可知整根光纤上发生了 1.001 MHz 和 1.002 MHz 两种频率的振动, 但无法感知不同频率振动发生的位置。图 10(c) 的底噪声较低, 主要是因为式(6)、(7)中的  $\varphi(t - \Delta\tau_s) - \varphi(t)$  形成了一个两抽头滤波器, 滤波器的自由光谱范围为  $1/\Delta\tau_s$ , 1.001 MHz 和 1.002 MHz 频率的振动正好位于滤波器的下陷附近, 因此对相位噪声抑制效果较好。基于 TGD-OFDR 结构, 可以通过相位差分的方法解调出不同位置处的振动信号, 图 10(b) 为通过解调

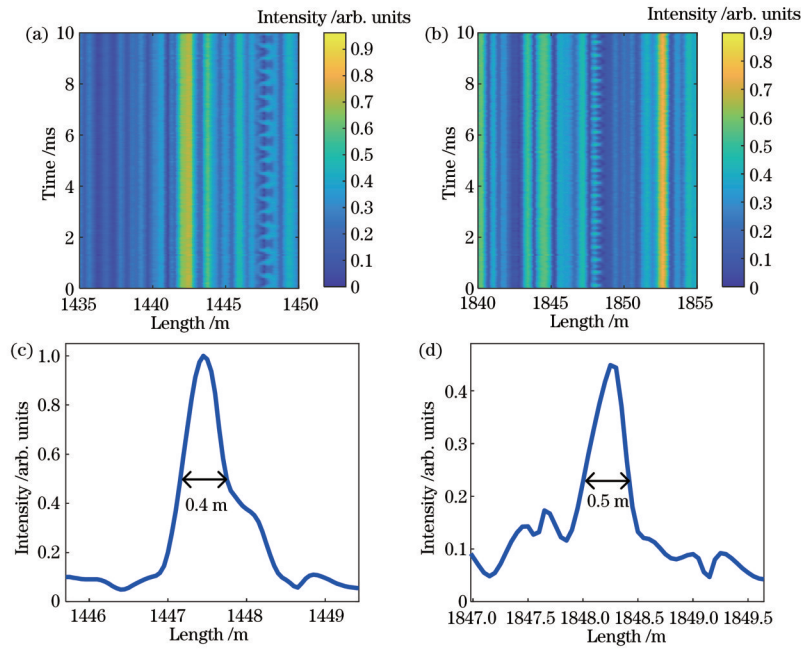


图 9 双点高频振动定位。(a)(b) TGD-OFDR 的强度轨迹;(c)(d) TGD-OFDR 强度的标准差

Fig. 9 Two-point high frequency vibration location. (a)(b) Intensity traces of TGD-OFDR; (c)(d) standard deviation of TGD-OFDR intensity

TGD-OFDR 相位得到的两个振动位置的时域波形, A 点振幅为 2.26 rad, B 点振幅为 4.53 rad, 与理论值相符。图 10(d) 为解调 TGD-OFDR 相位得到的 A 点与 B 点的振动信号 PSD, TGD-OFDR 解调的 A 点振动频率为 1 kHz, B 点振动频率为 2 kHz。由式 (14) 可知 1.001 MHz 的真实振动频率被折叠到 1 kHz,

1.002 MHz 的真实振动频率被折叠到 2 kHz。因此可以得出 A 点发生了频率为 1.001 MHz 的振动, B 点发生了频率为 1.002 MHz 的振动。解调结果与添加的振动信号一致说明了该系统响应良好。将 TGD-OFDR 和 MZI 相结合不但可以实现高空间分辨率的振动点定位, 而且可以实现高频振动信号真实频率与幅度的解调。

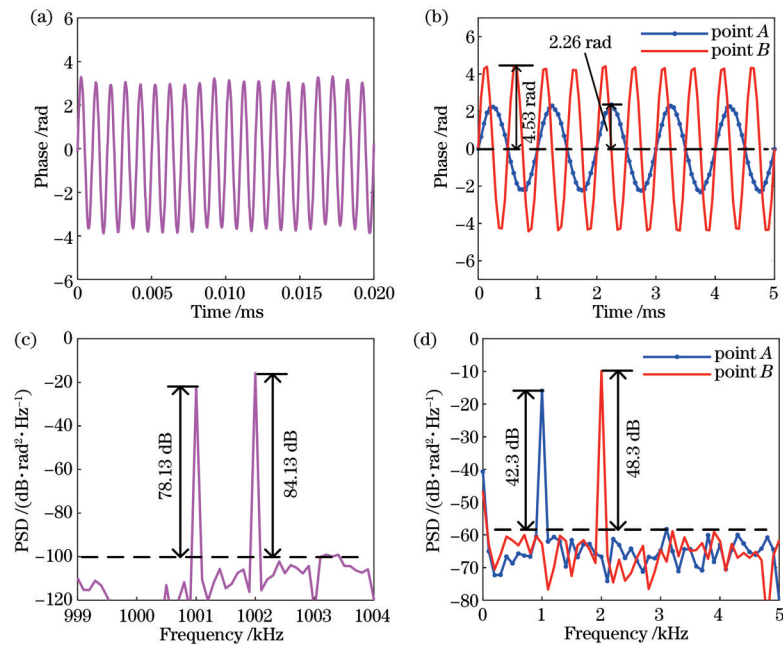


图 10 双点振动相位解调。(a) MZI 时域相位解调结果;(b) TGD-OFDR 在振动位置的时域相位解调结果;(c) 通过解调 MZI 相位得到的振动信号 PSD;(d) 通过解调 TGD-OFDR 相位得到的振动信号 PSD

Fig. 10 Phase demodulation of two-point vibration. (a) Time domain phase demodulation results of MZI; (b) time domain phase demodulation results of TGD-OFDR at vibration position; (c) PSD of vibration signal obtained by demodulating MZI phase; (d) PSD of vibration signal obtained by demodulating TGD-OFDR phase

### 3.5 讨论分析

前文通过对单点低频振动、单点高频振动和双点高频振动三种情况的仿真,验证了此系统在空间分辨率和高频响应中的优势,但都是对单频振动信号的测量,未对该系统能够测量的有效带宽进行分析与讨论。当某点振动信号的有效带宽小于 $f_i/2$ 时,本文系统能够实现 TGD-OFDR 测量结果与 MZI 测量结果的映射;振动信号的有效带宽大于 $f_i/2$ 会引起 TGD-OFDR 测量结果的频谱重叠,无法完成 TGD-OFDR 测量结果与 MZI 测量结果的映射。此外,由于本文信号的接收方式为 I/Q 接收,可以通过解调相位对振动信号的频率和振幅进行检测,所以当出现两个有效带宽小于 $f_i/2$ 的高频信号映射到同一频率时,还可以根据 MZI 解调相位的振幅为 TGD-OFDR 的 1/2 来区分振动信号,这为真实振动的解调提供了一个新的判断维度。

## 4 结 论

提出了一种将 TGD-OFDR 与 MZI 相结合的分布式光纤振动传感系统,此系统能够同时对多个振动点进行定位,并通过 I/Q 接收技术实现振动信号频率和幅度的解调。该系统同时具有高空间分辨率与大检测带宽的优势,通过仿真验证了在 4 km 传感光纤上系统的空间分辨率可以达到 0.5 m,检测带宽可以达到兆赫兹量级,相较于  $\Phi$ -OTDR 与干涉仪结合的系统米甚至十米量级的空间分辨率有较大提升。此外,由于本系统是通过解调相位检测振动信号,所以当多个振动频率同时映射到同一虚假频率时,还可以根据 MZI 解调相位的振幅为 TGD-OFDR 的 1/2 来区分振动信号,这为真实振动解调提供一个新的判断维度。

### 参 考 文 献

- [1] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.  
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [2] Zhang J D, Wu H T, Zheng H, et al. 80 km fading free phase-sensitive reflectometry based on multi-carrier NLFM pulse without distributed amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4748-4754.
- [3] Chen Q M, Jin C, Bao Y, et al. A distributed fiber vibration sensor utilizing dispersion induced walk-off effect in a unidirectional Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2167-2173.
- [4] Kowarik S, Hussels M T, Chruscicki S, et al. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: conventional and neural network data analysis[J]. Sensors, 2020, 20(2): 450.
- [5] 马喆, 王逸璇, 江俊峰, 等. 光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306008.  
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic

- range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306008.
- [6] 王宇, 靳宝全, 张建国, 等. 基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328016.  
Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing based on chaotic laser interference[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328016.
- [7] 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.
- [8] Parker T, Shatalin S, Farhadiroushan M. Distributed acoustic sensing: a new tool for seismic applications[J]. First Break, 2014, 32(2): 2013034.
- [9] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.  
Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- [10] Ma P F, Liu K, Sun Z S, et al. Distributed single fiber optic vibration sensing with high frequency response and multi-points accurate location[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106060.
- [11] Shi Y, Feng H, Zeng Z M. Distributed fiber sensing system with wide frequency response and accurate location[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 219-224.
- [12] Zhu T, He Q, Xiao X H, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2953-2963.
- [13] He H J, Shao L Y, Luo B, et al. Multiple vibrations measurement using phase-sensitive OTDR merged with Mach-Zehnder interferometer based on frequency division multiplexing[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4842-4855.
- [14] Zhang Y X, Xia L, Cao C Q, et al. A hybrid single-end-access MZI and  $\Phi$ -OTDR vibration sensing system with high frequency response[J]. Optics Communications, 2017, 382: 176-181.
- [15] Sun Z S, Liu K, Jiang J F, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response by using WDM based integrated scheme[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(15): 155106.
- [16] Zhao Z Y, Tang M, Wang L, et al. Distributed vibration sensor based on space-division multiplexed reflectometer and interferometer in multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5764-5772.
- [17] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105966.
- [18] Wang S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [19] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth



- and high signal-to-noise ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(10): 2037-2043.
- [20] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [21] Chen D, Liu Q W, He Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [22] Yan Y X, Khan F N, Zhou B, et al. Forward transmission based ultra-long distributed vibration sensing with wide frequency response[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(7): 2241-2249.
- [23] Liokumovich L B, Ushakov N A, Kotov O I, et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(17): 3660-3671.[LinkOut]
- [24] Chen D, Liu Q W, He Z Y. 108-km distributed acoustic sensor with  $220\text{-p}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  strain resolution and 5-m spatial resolution[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4462-4468.
- [25] 易守天, 张志勇, 何海军, 等. 脉冲参量对时间门控光频域反射仪性能的影响[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 162-167.
- Yi S T, Zhang Z Y, He H J, et al. The influence of pulse parameters on the performance of time-gated digital optical frequency domain reflectometer[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 162-167.