

## 多频 COTDR 系统的相位解调优化方法

谢浪, 吴明松, 王粤晖, 杨子逸, 饶云江, 吴宇\*

电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

**摘要** 提出一种基于多频优化分集(MFOD)算法的相位解调技术,搭建了环移多频相干光时域反射(MF-COTDR)系统,实验探究了MFOD算法对信号解调性能的提升效果。结果表明,MFOD算法不仅能够较好地还原相位信息,相较于传统的相位解调算法有超过9 dB的平均信噪比(SNR)提升,实现了 $33.3 \text{ p}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 的最小应变分辨率。此外,通过实验验证了基于MFOD算法的MF-COTDR系统对不同频率振动信号的响应性能,实验结果说明该系统具有良好的线性响应能力。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感; 相位敏感光时域反射仪; 相位解调

**中图分类号** TP212.9 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231442

## 1 引言

近年来,光纤分布式声学传感(DAS)系统被广泛地应用到油气管道监测、国防安全监控、电力电缆监测以及大型基础设施的结构健康监测等领域<sup>[1-9]</sup>。基于相干光时域反射(COTDR)技术的DAS系统因具有超高灵敏度、大动态范围、多点实时在线监测等优势而深受广大研究人员青睐。DAS应用范围的扩大,意味着需要更高灵敏度的声学测量方案和更低的噪声基底。为了满足这些需求,研究人员针对COTDR系统采用了降低系统相位噪声和抑制解调信号衰落等技术手段。相位噪声的降低可以通过线宽更窄、相干性更好的激光光源实现,甚至可以采用性能更佳的光学频率梳光源实现亚皮应变量级的声学振动测量。另外,为了消除偏振、相位和强度等引起信号衰落因素带来的影响,人们采用了各种各样的技术。

对于偏振衰落,研究人员通常采用偏振分集的方案进行消除。此外,Gorajooobi等<sup>[10]</sup>提出一种利用高速偏振控制器调控偏振态变化的思路,并实现了偏振衰落的消除。相位衰落则可以通过相干检测方法得到抑制,利用后向瑞利散射(RBS)光与本振(LO)光混合,并在电域<sup>[11]</sup>中提取相位信息。对于强度衰落,在COTDR系统中通常采用频率分集方案<sup>[12]</sup>。在这种技术中,光源的波长在一定的频率范围内以固定的频率间隔步进,以产生一些具有统计上独立的相干瑞利噪声(CRN)模式的RBS迹线。此外,频率分集技术还可以增大传感器带宽<sup>[13-14]</sup>,提高注入光纤的平均功率<sup>[15]</sup>

等。然而,这种方法在COTDR系统中也会导致信噪比(SNR)降低,只是因为更多不同频率的探测脉冲被注入到光纤中<sup>[14]</sup>。Lin等<sup>[16]</sup>发现,自由度 $M \leq 5$ 的非相干散射光可有效抑制衰落现象。然而,这些研究并没有定量描述多频分集方法,也没有充分考虑分集增益对多频分集的COTDR系统中发生干涉衰落事件时噪声基底的影响。事实上,尽管频率分集方法对干涉衰落具有一定的抑制作用,但衰落现象仍会导致多频分集系统的噪声基底增加。

本文提出一种基于频移环路结构的多频COTDR(MF-COTDR)系统的相位解调优化算法。在不增加光学系统复杂度的前提下,通过采用选择性频率分集方法,有效地抑制了信号的强度衰落,从而提高了检测信号的信噪比。详细介绍了多频优化分集(MFOD)算法的实现过程,MFOD算法消除了强度衰减信道中的解调信号,显著改善了多频解调信号分集的噪声基底;同时分析了基于MFOD算法的MF-COTDR系统的频率响应范围,实现了宽频振动信号的高质量检测。

## 2 基本原理

## 2.1 COTDR原理

在COTDR系统中,RBS光可以用后向散射脉冲模型表示。当宽度为 $W$ 的光脉冲传输到光纤中时, $t$ 时刻RBS光的电场强度<sup>[17]</sup>可表示为

$$E_R(t) = E_r \sum_{i=1}^N r_i \text{rect}[(t - \tau_i)/W] \times \exp\left\{j\left[2\pi(f_0 + \Delta f)(t - \tau_i) + \varphi_0 + \phi_i\right]\right\}, \quad (1)$$

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-10-06; 录用日期: 2023-10-23; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 重点联合基金项目(U21A20453)

通信作者: \*wuyu@uestc.edu.cn

式中:  $r_i = \alpha_i \exp(-\alpha v \tau_i)$ ,  $\alpha$  为光功率衰减系数,  $v$  为光在光纤中的速度;  $\alpha_i$ ,  $\phi_i$  和  $\tau_i$  分别为第  $i$  个散射体的幅值、相位和相对延迟;  $E_r$ ,  $f_0$  和  $\varphi_0$  分别为入射光的电场强度、频率和初始相位;  $\Delta f$  为移频器引起的频移量;  $N$  为散射体的总数。系统中, LO 光的电场强度可表示为

$$E_L(t) = A_1 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_i)], \quad (2)$$

式中:  $A_1$  为 LO 光的振幅;  $\varphi_i$  为激光的相位噪声。LO 光与从传感光纤返回的 RBS 光混合, 产生一个相干拍频信号。通过平衡光电探测器 (BPD) 检测拍频信号的交流分量。BPD 的输出信号可以表示为

$$I(t) = 2A_1 E_r \sum_{i=1}^N r_i \text{rect}[(t - \tau_i)/W] \times \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\varphi_i). \quad (3)$$

对于 MF-COTDR 系统, 由于频移环路结构产生  $n$  个探测光频率脉冲, 因此  $\Delta f = f_1 + f_2 + \dots + f_n$ , 其中  $f_n$  为第  $n$  个中频信号。此外, 在信号解调过程中, 采用传统 COTDR 系统中经典的反正切相位解调算法, 并结合与检测频率相对应的带通滤波器进行 MF-COTDR 系统的相位信号解调。采集的拍频信号可以简单地描述为

$$I(t) = A(t) \cos[2\pi\Delta f t + \Phi(t)], \quad (4)$$

式中:  $A(t)$  和  $\Phi(t)$  分别为 RBS 光的振幅和相位。经过中心频率为  $f_n$  的带通滤波器得到第  $n$  个中频信号,

将其视为 IQ 解调信号的 I 路, 可表示为

$$I(t) = A(t) \cos[2\pi f_n t + \Phi(t)]. \quad (5)$$

经过 Hilbert 变换得到 Q 路信号:

$$Q(t) = A(t) \sin[2\pi f_n t + \Phi(t)]. \quad (6)$$

光学相位信息  $\varphi(t)$  可表示为

$$\varphi(t) = \arctan[Q(t)/I(t)]. \quad (7)$$

由于光相位随光纤距离的增加而增大, 必须计算两个位置之间的相位差以检索局部应变引起的相移。定义一个规距长度  $\Delta l$ , 它对应于传感器的实际空间分辨率, 则传感光纤位置  $z$  处的差分相位可以表示为

$$\Delta\varphi(z) = \varphi(z) - \varphi(z - \Delta l). \quad (8)$$

首先, 根据上述理论和 Liokumovich 等<sup>[18]</sup> 的参数设置, 仿真得到拍频信号的 I 路和 Q 路如图 1(a) 所示。需要指出的是, 所模拟的 I、Q 路信号忽略了探测器引入的白噪声, 并且为了更加清晰地进行比较, 图 1 中 Q 路信号的位置被下移。然后, 通过改变探测脉冲频率仿真得到 5 个不同频率的探测信号所对应的 RBS 光的强度曲线  $A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$ , 如图 1(b) 所示。可以看到, 同一个传输通道不同频率探测信号得到的散射光强度抖动不同, 出现干涉衰落的位置也不同。先前的研究结果<sup>[12]</sup> 表明, 探测脉冲的光学频率变化可以改变某个区域的相位  $\varphi(t)$ , 这意味着如果一个探测脉冲在位置  $z_1$  处有衰落, 那么可以通过注入多个频率的探测脉冲并结合线性聚合等<sup>[12]</sup> 实现位置  $z_1$  处强度衰落的抑制。

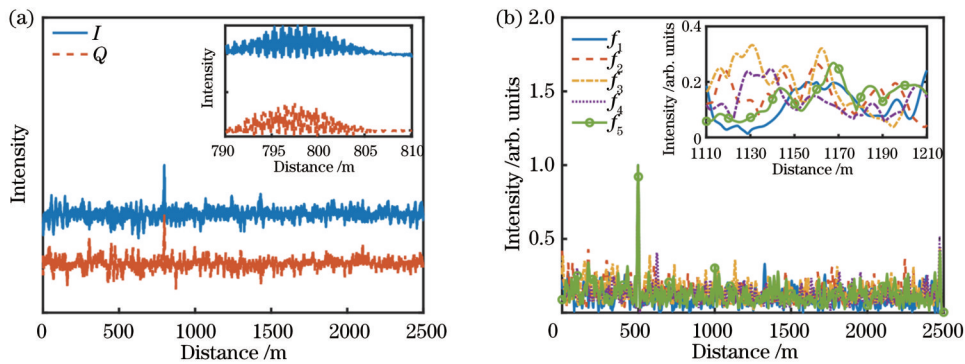


图 1 COTDR 强度曲线仿真结果。(a) 通过模拟 I/Q 解调和希尔伯特变换获得的 I 和 Q 分量; (b) 不同探测频率下的强度曲线  
Fig. 1 Simulation results of COTDR intensity curves. (a) I and Q components obtained by analog I/Q demodulation and by Hilbert transform; (b) intensity curves at different detection frequencies

## 2.2 多频优化分集算法

在 MF-COTDR 系统的数据处理过程中, 多频信号的有效聚合是实现衰落抑制的关键。本研究采用旋转矢量求和法获得每个频带信号。由于拍频信号是矢量信号, 因此信号之间的相位角差决定了求和结果的质量。当两个矢量信号相位角之差小于  $90^\circ$  时, 求和结果增大了矢量信号的强度; 当两个矢量信号相位角之差超过  $90^\circ$  时, 求和法会导致两个矢量信号强度之和小于单个矢量信号强度。幸运的是, 旋转矢量求和算法可以通过旋转一个矢量信号的方向来匹配

另一个矢量信号, 从而获得最大的求和强度。需要注意的是, 需要对每个检测频率信号执行旋转矢量求和, 以确保每个检测频率信号发生衰落的概率最小。然而, 旋转矢量求和算法不能完全消除干涉衰落, 这会导致 MF-COTDR 系统中多个检测频率信号的直接线性聚合方案不都是有利的相位解调信号的还原, 甚至可能导致无法正确还原原始信号的相位信息。因此, 本文提出一种用于 MF-COTDR 系统中消除信号衰落事件的相位解调优化算法, 具体实现思路如图 2 所示。首先, 将从 MF-COTDR 系统获得的原始

数据输入到由不同检测频率定义的滤波器中,得到  $n$  个相位解调信号;然后,利用优化算法,可以根据选择因子  $R$  选择  $m$  ( $m \leq n$ ) 个目标信号;最后,利用等增益组合 (EGC) 对所选信号进行组合,重构出相位解调信号。

本研究中将选择因子  $R$  定义为

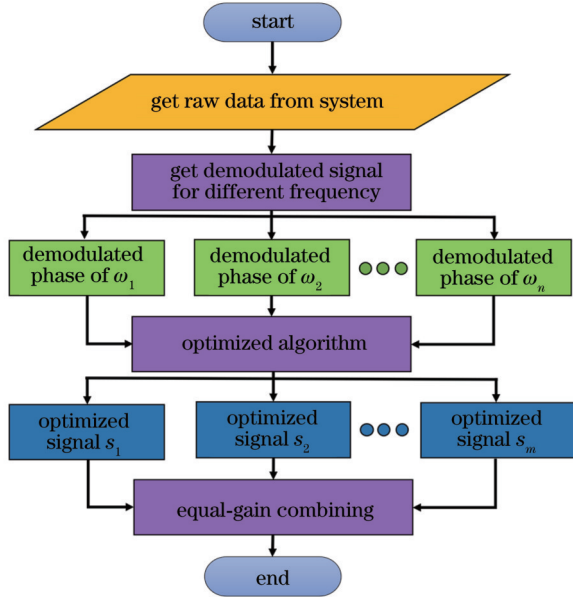


图 2 所提优选算法的流程图  
Fig. 2 Flow chart of proposed optimization algorithm

$$R = \text{sort}[\text{xcorr}(m_p, m_q)] (p \neq q), \quad (9)$$

式中:  $\text{sort}[\cdot]$  为筛选函数;  $\text{xcorr}(\cdot)$  为互相关函数;  $m_p$  和  $m_q$  分别为第  $p, q$  个检测频率。

### 3 MF-COTDR 系统构建

MF-COTDR 系统的实验构建如图 3(a) 所示。光纤耦合器  $OC_1$  将窄线宽光纤激光器 (NKT X15, 带宽  $< 100$  Hz) 发出的光分成两部分: 80% 的光经过声光调制器  $AOM_1$  调制, 产生频移为 80 MHz 的高消光比检测脉冲; 20% 的光作为 LO 光。脉冲重复频率和脉冲宽度分别设置为 10 kHz 和 100 ns。脉冲光经掺铒光纤放大器  $EDFA_1$  放大后注入  $OC_2$ 。  $OC_2$  的一个输出端口耦合到环形器 (CIR), 另一个输出端口进入包含  $AOM_2$  的光纤频移环路结构中, 将光转换成一系列频移脉冲。将  $EDFA_2$  用于补偿频移环路结构带来的损耗, 以保证每个调制脉冲具有相同的消光比。隔离器 (ISO) 则可以屏蔽在生成第  $n$  个频移脉冲时, 前面  $n-1$  个脉冲在  $OC_2$  处发生反射带来的影响。光纤环路以 100 MHz 的调制频率驱动, 产生 4 个脉冲 (脉冲宽度均为 100 ns), 频率间隔为 100 MHz, 再加上  $AOM_1$  调制产生的第一个脉冲, 共计 5 个调制脉冲, 频移脉冲调制方法如图 3(b) 所示。脉冲之间的 100 MHz 频率间隔足以保证不会发生脉冲间串扰<sup>[17]</sup>。多频脉冲光从环形器输出, 通过长度分别为 1.02 km 和 2 km 的标准单模

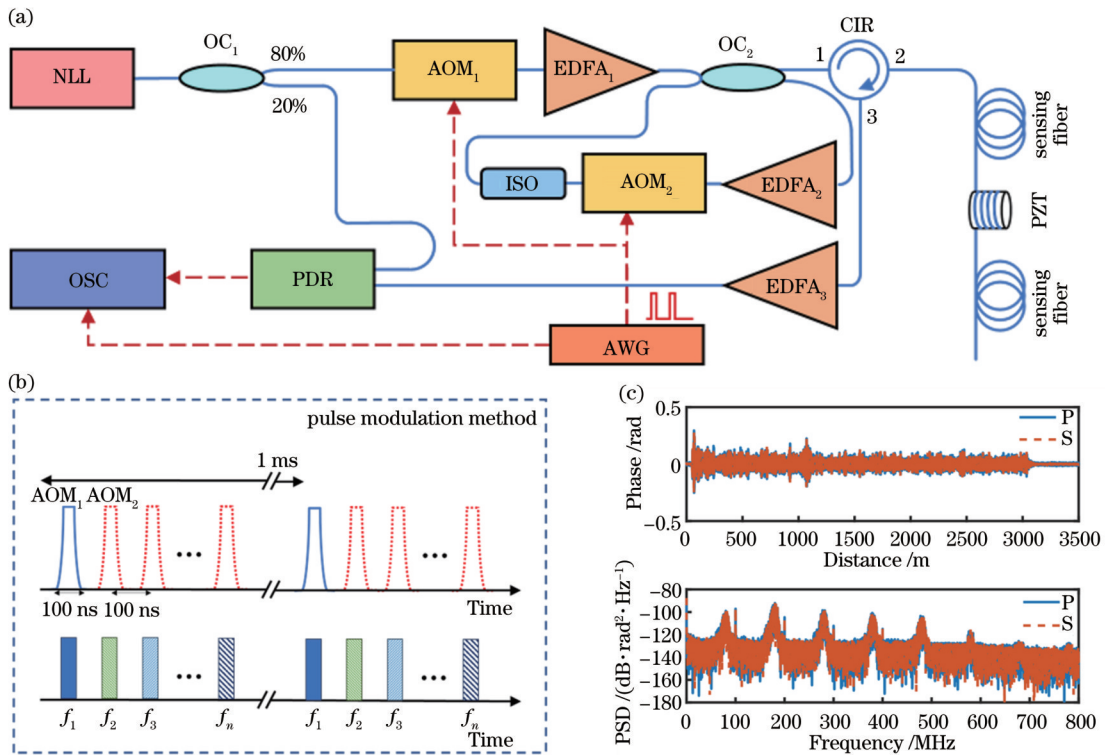


图 3 MF-COTDR 传感系统和实验方案。(a) MF-COTDR 传感系统; (b) 脉冲调制方案示意图; (c) MF-COTDR 系统 P、S 偏振的拍频信号和 PSD

Fig. 3 MF-COTDR sensing system and experimental scheme. (a) MF-COTDR sensing system; (b) schematic of pulse modulation scheme; (c) beat signal and PSD of P and S polarization in MF-COTDR system



光纤组成的测试光纤。在两段测试光纤之间用光纤绕制长度为 4 m 的压电陶瓷 (PZT), 以产生动态应变。拍频信号由偏振分集接收 (PDR) 模块中两个带宽均为 2 GHz 的 BPD 接收, 然后送入采样率为 1 GSa/s、分辨率为 16 位的示波器 (OSC)。任意波形发生器 (AWG) 用于驱动 AOM<sub>1</sub>、AOM<sub>2</sub> 生成调制脉冲和 OSC 数据采集的触发同步。实验得到的 3 km MF-COTDR 系统 P、S 偏振的拍频原始信号及其 PSD 如图 3(c) 所示。

## 4 实验结果分析和讨论

### 4.1 优选算法验证

为了验证 MFOD 算法对 MF-COTDR 系统信号解调性能的影响, 对每个检测频率下获得的 P、S 偏振态的相位数据结合幅度优选方案<sup>[19]</sup>进行单独处理, 并使用 EGC 算法进行组合。本研究中 COTDR 系统的相位信号解调采用反正切相位解调算法。首先, 利用 MF-COTDR 系统中 OSC 获取的相位数据对比了传统单一检测频率 COTDR 系统、多频分集 COTDR 系统以及多频优化分集 COTDR 系统的相位解调性能。图 4 显示了无频率分集的单频 COTDR 系统 [图 4(a)]、多频分集 (MFD) COTDR 系统 [图 4(b)] 和多频优化分集 COTDR 系统 [图 4(c)] 中经相位解调后被测光纤动态应变的时空-强度图。从图 4(a) 可以看出, 受到信号衰落的影响, 除了在 1025 m 处给定的

PZT 扰动信号, 该时空-强度图仍然存在大量的强度波动。实验过程中在被测光纤 1025 m 处的 PZT 由频率为 100 Hz、峰值电压为 2.5 V 的信号驱动, 用作时空-强度图中强度波动的参考信号。基于 MFD 进行相位解调的 MF-COTDR 系统通过多个检测频率的直接聚合, 可以显著削弱强度波动现象, 如图 4(b) 所示。这就表明来自多个检测频率的数据分集可以显著降低 MF-COTDR 系统中解调信号的相位噪声波动, 尽管仍有少量传感通道表现出较大的背景噪声, 即未能正确解调出相位信息, 但是从图 4(c) 可以明显看出, 多频率优化的数据采集产生的时空-强度图在 MF-COTDR 系统的所有传感通道中具有更均匀的强度波动, 并且其强度波动远小于 PZT 扰动信号。这与图 4(a) 中无频率分集的单频 COTDR 系统形成鲜明对比。实验结果表明, 通过 MFOD 算法对检测频率的选择, 可以在 MF-COTDR 系统的所有传感通道中获得更加均匀的相位噪声波动, 系统能够较好地实现信号相位解调。需要指出的是, 增加检测频率数量可以实现相对更低的相位噪声波动<sup>[16]</sup>, 当然也同时需要对更多的检测频率进行筛选。采用 MFOD 算法除了可以抑制信号衰落现象外, 聚合来自多个检测频率的数据也有助于降低 COTDR 系统的噪声基底。噪声基底降低是由多个检测频率相位信号的平均所导致的, 而所提出的基于 MFOD 算法的 MF-COTDR 系统可以保证所有检测频率都是有利于信号相位解调的。

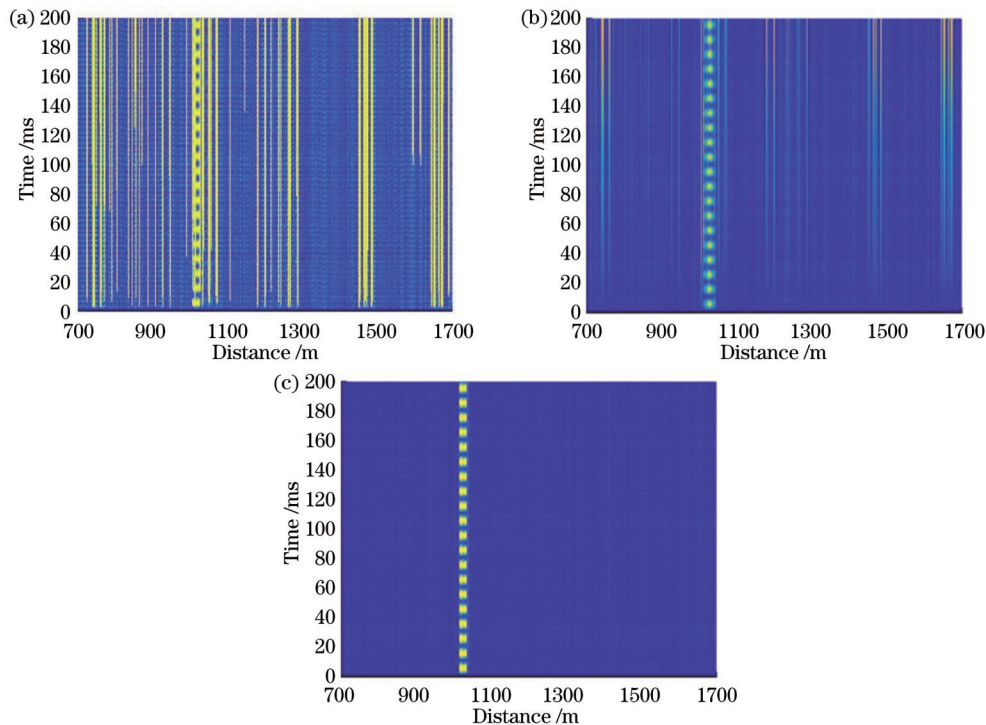


图 4 不同相位解调算法的 FUT 动态应变时空-强度图测试结果。(a) 无频率分集; (b) 多频聚合; (c) 多频优选

Fig. 4 Test results of FUT dynamic strain spatiotemporal intensity for different phase demodulation algorithms. (a) Without frequency diversity; (b) MFD; (c) MFOD

图 5(a) 显示了这 5 个检测频率下 PZT 在 1025 m 处的时域数据, 其中 s1、s2、s3、s4 和 s5 分别表示 80、180、280、380、480 MHz 这 5 个检测频率的相位解调信号。由于信号衰落的发生随时间的变化是随机的, 因此可以根据前述定义的选择因子  $R$  优选出具有较好 SNR 的检测频率信号。通过  $R$  的计算, 在图 5(b) 中选择 s2、s3、s4 和 s5 作为 MFOD 的优选检测频率信号。最后, 将选取的信号用 EGC 方法进行组合重构, 得到重构相位信号, 并在时域波形 [图 5(b)] 和功率谱密度 (PSD) [图 5(c)] 上与未优化的单频信号 s1 和传统 MFD 的相位解调信号进行比较。实验结果表明, 相较于单频信号 s1 与传统 MFD 的相位解调, 基于 MFOD 优化的相位解调信号能够更好地还原 PZT 扰动信号, 如图 5(b) 所示。从图 5(c) 可以看出, 基于 MFOD 优化的相位解调信号比基于单频信号 s1 的相位解调信号的 SNR 提高可达 20 dB, 比传统 MFD 的相位解调信号的 SNR 提高了 10 dB。上述比较是在 s1 发生信号衰落

事件的位置进行的, 这就说明通过优选算法能够成功筛选不利于信号相位解调的检测频率。进一步地, 通过计算可以得到整条传感光纤链路的噪声基底 (噪声基底的计算方法为 200~500 Hz 的均值<sup>[19]</sup>), 如图 5(d) 所示。通过计算得到整条光纤链路的平均 SNR, 其中单频信号 s1、传统 MFD 和基于 MFOD 优化的相位解调信号的平均 SNR 分别为 -51.5 dB、-54.6 dB 和 -60.6 dB, 由此可见, 基于 MFOD 优化的 MF-COTDR 系统相较于单一检测频率的 COTDR 系统具有约 9 dB 的平均 SNR 性能提升。平均 SNR 的计算不包含异常 SNR 值, 这里将 SNR 的阈值设置为 -40 dB, 超过该值则为异常 SNR 值。基于 MFOD 优化算法的 MF-COTDR 系统的应变分辨率可达到  $33.3 \text{ } \mu\text{e}/\text{Hz}^{1/2}$ , 这就表明所提出的基于 MFOD 算法的 MF-COTDR 系统能够筛选出有利于相位解调的信号进行增益聚合, 同时降低了 COTDR 系统的噪声基底。

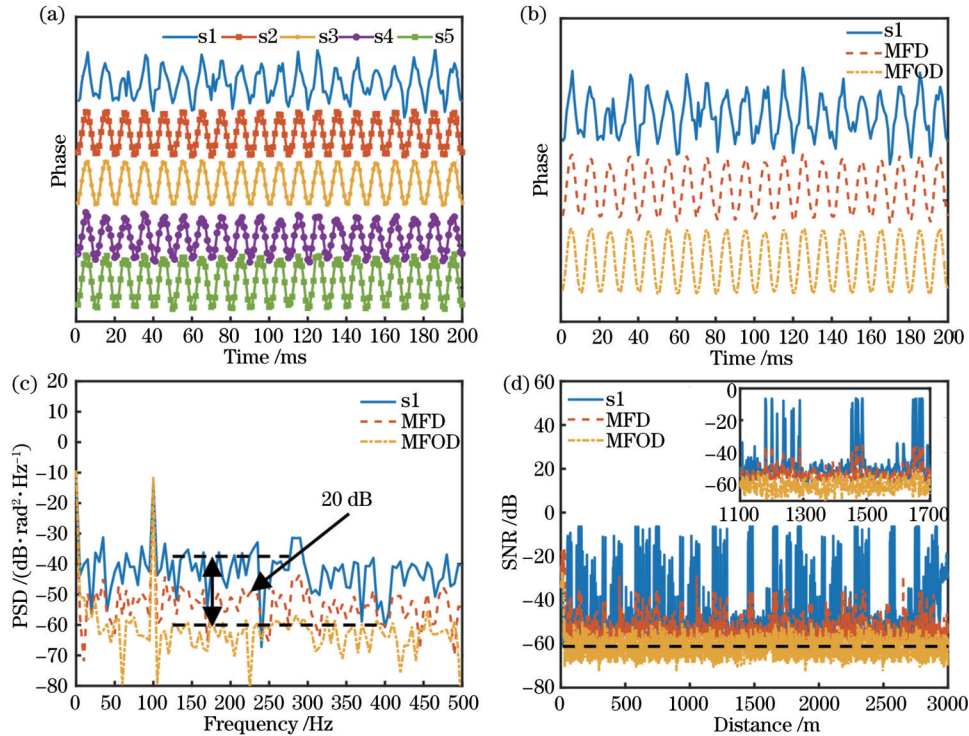


图 5 时频特征分析结果。(a) 5 种检测频率下 1025 m 处 PZT 扰动引起的时域响应; s1、MFD 和 MFOD 解调的 (b) 时域波形和 (c) PSD; (d) 整个光纤链路的 SNR 计算结果

Fig. 5 Analysis results of time-frequency characteristics. (a) Temporal domain response caused by PZT disturbance at 1025 m at five detection frequencies; s1, MFD, and MFOD demodulation of (b) temporal domain waveform and (c) PSD; (d) SNR calculation results of the whole optical fiber link

#### 4.2 频率响应范围测试

研究测试了基于 MFOD 算法的 MF-COTDR 系统对不同频率振动信号的相位解调性能。实验中将 PZT 的驱动扫描频率范围和扫描时间分别设置为 5 Hz~5 kHz 和 200 ms, 并利用 OSC 获取拍频信号 (实验过程中, 受到 OCS 设备数据存储长度的限制, 可采集的具有完整周期的低频振动信号下限为 5 Hz), 相

位解调和短时傅里叶变化 (STFT) 结果分别如图 6 (a)、(b) 所示。由此可以看出, MFOD 算法优化后的 MF-COTDR 系统较好地恢复了 5 Hz~5 kHz 频率范围内的正弦扰动信号。这是因为所提出的 MF-COTDR 系统能够较好地抑制低频振动信号测量中由光纤环境温度变化等引起的交叉敏感问题<sup>[20-21]</sup>。此外, 从图 6(c)、(d) 中 MF-COTDR 系统对 5 Hz 信号扰



动区域的时空-强度图和 PSD 可以看出,除了 PZT 信号的扰动区域外,非扰动区域没有出现明显的相位波动,

这就表明 MF-COTDR 系统能够较好地实现低频振动信号的测试,并且降低了发生信号衰落现象的概率。

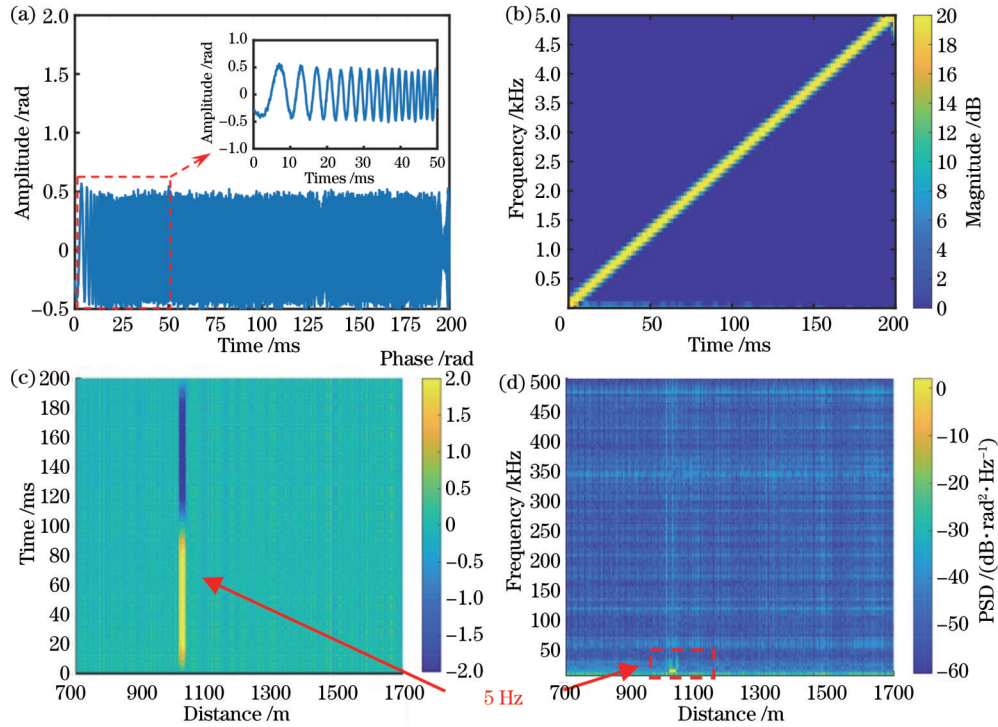


图 6 频率响应测试结果。线性啁啾信号的(a)时域波形和(b)STFT 结果;5 Hz 正弦信号的(c)时空-强度图和(d)PSD  
Fig. 6 Test results of frequency response. (a) Temporal domain waveform and (b) STFT of linear chirp signal; (c) spatiotemporal intensity map and (d) PSD of 5 Hz sin signal

进一步地,研究了 MF-COTDR 系统中 PZT 的驱动信号频率设置为 5 Hz、施加不同峰值电压的正弦信号,得到 MF-COTDR 系统对不同峰值电压条件下的响应结果,如图 7 所示。可以看到, MF-COTDR 系统对低频振动信号具有良好的响应,其响应的线性度相关系数  $R^2=0.9857$ 。由此可以看出,所提出的基于 MFOD 算法的 MF-COTDR 系统能够实现较宽频率范围内振动信号的高质量检测。

的相位解调优化算法。该算法可以选择性地从具有统计独立 CRN 模式的多个检测频率中自动识别更有利的相位解调信号。采用 MFOD 算法搭建了一个对所有传感通道实现均匀噪声基底的分布式传感系统。通过实验评估了 MFOD 算法对 COTDR 系统相位解调信号的总体噪声基底的影响。结果表明,当与 MFOD 算法结合使用时, MF-COTDR 系统的总体噪声基底得到了显著改善,其平均 SNR 的提升约为 9 dB,最小应变分辨率达到  $33.3 \text{ p}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。此外,研究了基于 MFOD 算法的 MF-COTDR 系统对不同频率范围内振动信号的响应能力,结果表明 MF-COTDR 系统具有较大的响应带宽和良好的线性响应。该研究结果对于改善 COTDR 系统的相位信号解调性能,促进其在实际工程的应用具有良好的参考价值。

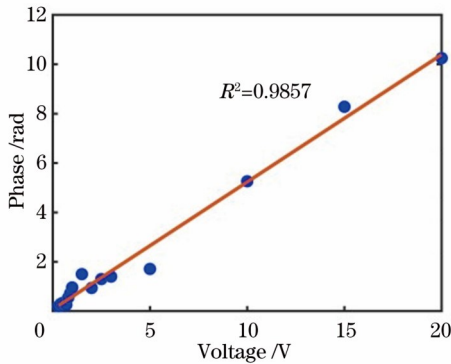


图 7 5 Hz 正弦信号的不同峰值电压条件下的响应结果  
Fig. 7 Response results of 5 Hz sin signal under different peak voltages

## 5 结 论

提出一种基于频移环路结构的 MF-COTDR 系统

## 参 考 文 献

- [1] Rao Y J, Wang Z N, Wu H J, et al. Recent advances in phase-sensitive optical time domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR) [J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 1-30.
- [2] Shi Y, Wang Y Y, Zhao L, et al. An event recognition method for  $\Phi$ -OTDR sensing system based on deep learning[J]. Sensors, 2019, 19(15): 3421.
- [3] Lindsey N J, Martin E R, Dreger D S, et al. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(23): 11792-11799.
- [4] Wang Z Y, Pan Z Q, Ye Q, et al. Vehicle tracking by

- $\Phi$ -OTDR used in safety monitored areas[C]//2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), June 28-July 2, 2015, Shanghai. New York: IEEE Press, 2015.
- [5] Wu H J, Liu X R, Xiao Y, et al. A dynamic time sequence recognition and knowledge mining method based on the hidden Markov models (HMMs) for pipeline safety monitoring with  $\Phi$ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 4991-5000.
- [6] 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.
- [7] 于淼, 张耀鲁, 何禹潼, 等. 变分模态分解-排列熵方法用于分布式光纤振动传感系统去噪[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0706005.  
Yu M, Zhang Y L, He Y T, et al. Variational mode decomposition and permutation entropy method for denoising of distributed optical fiber vibration sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0706005.
- [8] 赵艳夺, 王目光, 张静, 等. 高空间分辨率大带宽分布式光纤振动传感系统[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1906004.  
Zhao Y D, Wang M G, Zhang J, et al. Distributed optical fiber vibration sensing system with high spatial resolution and large bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906004.
- [9] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0100001.  
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0100001.
- [10] Gorajobi S B, Masoudi A, Brambilla G. Polarization fading mitigation in distributed acoustic sensors based on a high-speed polarization rotator[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1283-1286.
- [11] Mompó J J, Shiloh L, Arbel N, et al. Distributed dynamic strain sensing via perfect periodic coherent codes and a polarization diversity receiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4597-4602.
- [12] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic-distributed vibration sensing[J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(S1): 192-202.
- [13] 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]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 2037-2043.
- [14] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [15] Matthew J M, Brandon R. Quantitative amplitude-measuring  $\Phi$ -OTDR with  $\text{pe}/\sqrt{\text{Hz}}$  sensitivity using a multi-frequency pulse train[J]. *Optics Letters*, 2022, 45(18): 5226-5229.
- [16] Lin S T, Wang Z N, Xiong J, et al. Rayleigh fading suppression in one-dimensional optical scatters[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17125-17132.
- [17] Mermelstein M D, Posey R, Jr, Johnson G A, et al. Rayleigh scattering optical frequency correlation in a single-mode optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(2): 58-60.
- [18] 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.
- [19] 张旭苹, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306001.  
Zhang X P, Chen X H, Liang L, et al. Enhanced C-OTDR-based online monitoring scheme for long-distance submarine cables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306001.
- [20] Soriano-Amat M, Martins H F, Durán V, et al. Quadratic phase coding for SNR improvement in time-expanded phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4406-4409.
- [21] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142-1146.

## Phase Demodulation Optimization Method for Multi-Frequency COTDR System

Xie Lang, Wu Mingsong, Wang Yuehui, Yang Ziyi, Rao Yunjiang, Wu Yu\*

*Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications (Education Ministry of China), School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** Optical fiber distributed acoustic sensing (DAS) system is a type of acoustic sensor built upon optical fibers and optoelectronic technology. It primarily utilizes optical coherence detection technology to convert acoustic vibration signals into optical signals, which are then transmitted through optical fibers to a signal processing system, thereby obtaining valuable acoustic wave data. They possess advantages such as high sensitivity, wide dynamic range, resistance to electromagnetic interference, structural flexibility, scalability into large-scale arrays, and suitability for extremely harsh conditions. Consequently, since their advent, driven by significant military and civilian applications, they have rapidly developed into an important direction in modern optical sensing and acoustic sensing technology. In recent years, DAS has been widely applied in fields such as oil and gas pipeline monitoring, national defense security surveillance, power cable monitoring, and structural health monitoring of large-scale infrastructure. With the expanding applications of DAS, there

is a growing need for acoustic measurement solutions with higher sensitivity and reduced noise floors. To meet these demands, researchers have employed techniques to reduce system phase noise and suppress the fading phenomenon in the context of coherent optical time-domain reflectometry (COTDR) systems. The traditional COTDR systems struggle to achieve ideal signal demodulation due to the presence of signal fading phenomena. We propose a phase demodulation technique based on the multi-frequency optimized diversity (MFOD) algorithm.

**Methods** This experiment employed a multi-frequency coherent optical time-domain reflectometry (MF-COTDR) system based on the frequency-shifted loop structure. Firstly, a detailed description of the phase demodulation method in the traditional COTDR systems was provided. This was followed by the utilization of multiple matching bandpass filters to separate detection pulses of different frequencies, achieving phase demodulation in the MF-COTDR system. Subsequently, we designed an MFOD algorithm based on the MF-COTDR system and established a coherent detection system for MF-COTDR, incorporating a frequency-shifted loop structure and a polarization diversity receiver. This reduced the influence caused by signal fading due to polarization fading and phase fading. Then, we verified the influence of the MFOD algorithm on the signal demodulation performance of the MF-COTDR system and tested the frequency response range of the MF-COTDR system.

**Results and Discussions** Since the MFOD algorithm filters out phase signals in frequency bands unfavorable for gain aggregation, the phase variation information exhibits significantly improved SNR, rendering the phase fluctuations of the fiber under test (FUT) extremely weak in the absence of external disturbances (Fig. 4). Subsequently, a comparative analysis is conducted on the phase demodulation signals of single detection frequency COTDR, MF-COTDR, and MF-COTDR based on MFOD. The results indicate that the adoption of the MFOD algorithm not only suppresses signal fading but also reduces the noise floor of the COTDR system (Fig. 5). Further testing of the frequency response range of the MF-COTDR system demodulated by the MFOD algorithm shows that the system can achieve excellent broadband frequency response (Fig. 6).

**Conclusions** We propose an optimized phase demodulation algorithm for the MF-COTDR system based on the frequency-shifted loop structure. This algorithm can selectively and automatically identify favorable phase demodulation signals from multiple detection frequencies with statistically independent coherent rayleigh noise patterns. The adoption of the MFOD algorithm enables the creation of a distributed sensing system with a uniform noise floor across all sensing channels. Through experiments, the impact of the MFOD algorithm on the overall noise floor of phase demodulation signals of the COTDR system is evaluated. The results show that when combined with the MFOD algorithm, the overall noise floor of the MF-COTDR system is significantly improved; the average signal-to-noise (SNR) is increased by about 9 dB, and the minimum strain resolution reaches  $33.3 \text{ } \mu\text{e}/\text{Hz}^{1/2}$ . In addition, we study the response of the MF-COTDR system based on the MFOD algorithm to vibration signals in different frequency ranges. The results show that the MF-COTDR system has larger response bandwidth and better linear response. The research has a good reference value for improving the phase signal demodulation performance of the COTDR system and promoting its application in practical engineering.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensing; phase-sensitive optical time-domain reflectometer; phase demodulation