

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210175

基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 信号衰落抑制方法^{*}

王宇^{1,2}, 王俊虹¹, 梁斌², 刘昕¹, 靳宝全¹

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室 太原 030024;

2. 山西省交通科技研发有限公司 太原 030600)

摘要:多频探测是相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)光纤传感系统中干涉衰落抑制的重要手段,但存在多频率生成造成结构复杂的问题。提出了一种基于光纤移频延时环的多频脉冲产生方法,设计了包含移频、放大、延时、滤波、隔离等环节的光纤环结构,使用简单结构实现了多频探测脉冲的产生与复用。并分别采用脉冲延时补偿算法与旋转矢量求和算法对瑞利后向散射拍频信号实现了数据对齐与数据聚合。实验结果表明,传感系统通过生成包含6个频率分量的多频探测脉冲,可在10.33 km的传感光纤上将衰落概率由26.43%优化至0.93%,并实现了信噪比为5.29 dB的振动信号准确定位,以及相关系数为0.997的振动信号线性解调,从而为 Φ -OTDR系统在复杂环境下的振动信号抗衰落解调提供了新的解决方案。

关键词: 光纤传感; 相位敏感光时域反射仪; 光纤移频延时环; 干涉衰落抑制

中图分类号: TH741 TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Fading suppression method of Φ -OTDR signal based on optical fiber frequency-shifted delay loop

Wang Yu^{1,2}, Wang Junhong¹, Liang Bin², Liu Xin¹, Jin Baoquan¹

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030600, China)

Abstract: The multi-frequency detection is an important way of interference fading suppression in the optical fiber sensing system of Φ -OTDR. But, there is the problem of complex structure caused by multi-frequency generation. A multi-frequency pulse generation method based on the optical fiber frequency-shifted delay loop is proposed in this article. Optical fiber loop structure is designed with frequency shift, amplification, delay, filtering, isolation and other functions. The generation and multiplexing of multi-frequency detection pulses are realized by using this simple structure. The data alignment and data aggregation of Rayleigh backward scattering beat signal are realized by using the pulse delay compensation algorithm and rotated-vector-sum algorithm, respectively. The experimental results show that the sensing system can optimize the fading probability from 26.43% to 0.93% with the 10.33 km sensing fiber by the generation of multi-frequency detection pulses containing six frequency components, and achieve the accurate location of the vibration signal with a signal-to-noise ratio of 5.29 dB and the linear demodulation of the vibration signal with a correlation coefficient of 0.997. It provides a new solution of anti-fading demodulation of vibration signal for Φ -OTDR in complex environment.

Keywords: optical fiber sensing; Φ -OTDR; optical fiber frequency-shifted delay loop; interference fading suppression

收稿日期: 2022-07-22 Received Date: 2022-07-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(62175175)、山西省基础研究计划(202103021222010)、山西省基础研究计划(20210302124599)、山西省专利转化专项计划项目(202202050)、山西省重点研发计划项目(202102130501021)、山西省科技创新人才团队专项(201805D131003)资助

0 引 言

相位敏感光时域反射仪 (phase-sensitive optical time-domain reflectometry, Φ -OTDR) 可利用传感光纤实现分布式、长距离、大范围的振动感知,在轨道交通运输、海底光缆通信、智能电网监测、重大基础设施安全、油气资源勘探与输送等领域有着广阔的应用前景^[1-3]。

近年来广泛研究的相位解调型 Φ -OTDR,基于瑞利后向散射光 (Rayleigh backward scattering, RBS) 相位变化与外界振动之间的线性关系^[4],通常利用相干探测技术实现散射光与本振光的拍频,从而可定量还原振动信号^[5]。 Φ -OTDR 通常采用高相干性的窄线宽激光光源,由于光纤折射率在空间上的不均匀分布,使得在探测脉冲宽度内不同散射点间会发生干涉相消,被称作干涉衰落效应^[6]。由于干涉衰落,RBS 信号强度随机起伏,并在衰落位置处强度接近于零并淹没在噪声之中,导致振动信号的相位无法正常解调。因此,干涉衰落是影响 Φ -OTDR 系统相位解调准确性的关键因素。

以频率分集为基础的多频探测方法利用具有不同频率的光脉冲进行振动探测以获得相互独立的 RBS 信号,并利用信号聚合方式减小接收信号的衰落现象,已在 Φ -OTDR 衰落噪声抑制方面得到了广泛关注。2012 年,Lu 等^[7]利用相位调制器将单频光调制为具有 32、40 和 48 MHz 共 3 个频率分量的光脉冲,实现了衰落噪声的快速收敛。2013 年,Zhou 等^[8]同样利用相位调制器生成了包含 90、160 和 230 MHz 共 3 个频率的瑞利散射拍频信号,并通过多频信号综合鉴别来排除衰落导致的误报。2018 年,Chen 等^[9]利用强度调制器结合匹配滤波算法生成具有正、负频率分量的线性调频探测脉冲以抑制干涉衰落噪声。2019 年,Zhang 等^[10]采用电光调制器获得包含 130、200 和 270 MHz 共 3 个频率分量的多频非线性探测脉冲,对多频脉冲分别进行独立解调以减小干涉衰落噪声。2019 年,Zabihi 等^[11]并联移频为 40、80、150 MHz 的 3 个声光调制器,并采用最优跟踪算法对光纤振动区域附近多个非振动参考区域进行相位重构实现了干涉衰落引起失真现象的显著抑制。2019 年,Wu 等^[12]引入矩形脉冲频谱旁瓣的边带特征信息进行频谱提取以及再混合实现了干涉衰落现象的消除。2022 年,Wang 等^[13]利用相位调制器产生多频光脉冲,并通过辅助干涉仪反馈来主动改变调制频率,从而可将衰落区转换为非衰落区。

因此,多频探测是实现 Φ -OTDR 干涉衰落抑制的重要手段,且频率分量越多,干涉衰落抑制效果越明显^[14]。然而,传统多频探测方案所使用的频率分量以 3 个为主,因数目有限而导致干涉衰落抑制效果难以进一步提升。利用多级边带调制来增加频率分量则存在易受环境干扰

且边带一致性较差的问题,而多个移频器件并联来增加频率分量则存在数据不易对齐且器件成本较大的缺陷。为此,本文在传统的 Φ -OTDR 光纤传感系统中引入了一种光纤移频延时环结构,并在光纤环内对探测光脉冲进行重复的移频、放大、延时、滤波、隔离等处理,从而可简便稳定地产生多频延时探测光脉冲串。此外,利用脉冲延时补偿算法对多频瑞利散射拍频信号进行数据对齐,利用旋转矢量求和算法对多频瑞利散射拍频信号进行数据聚合。最后,通过实验验证了上述方法对于 Φ -OTDR 系统干涉衰落抑制的提升效果,从而可为复杂环境下振动信号的抗衰落解调提供参考。

1 多频探测 Φ -OTDR 理论

1.1 相干探测工作原理

在相干探测 Φ -OTDR 系统中,窄线宽激光器所发出的连续光经光纤耦合器进行分光后可得到信号光与本振光。随后,以声光调制器、电光调制器为代表的激光强度调制器件可实现连续信号光向脉冲信号光的调制转化。而为了实现相干探测,以相位调制器、声光调制器为代表的移频器件可实现信号光频率的搬移。脉冲信号光随后经激光放大、激光滤波等处理后会注入到传感光纤中,并不断产生强度上下起伏的 RBS 信号。

在 $t=0$ 时,以频率 ω 向传感光纤注入脉冲宽度为 W 的脉冲光,经过时间 t 后在入纤位置处接收到的 RBS 信号光场 $E_s(t)$ 为:

$$E_s(t) = \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\alpha \frac{cd_k}{\eta_f}\right) \exp(j\omega(t-d_k)) \text{rect}\left(\frac{t}{W}\right) \quad (1)$$

式中: N 为传感光纤中散射体的数目; A_k 为第 k 个散射体幅值且服从瑞利分布; α 为光纤损耗系数; c 为真空中光速; d_k 为第 k 个散射体的延时; η_f 为光纤折射率; ω 为探测光脉冲频率; W 为探测脉冲宽度, $\text{rect}(t/W)$ 为矩形函数,其中当 $0 \leq t/W \leq 1$ 时矩形函数值为 1,其余范围时矩形函数值为 0。

同时,由光纤耦合器分出的本振光光场 $E_L(t)$ 为:

$$E_L(t) = B \exp(j(\omega t + \varphi_0)) \quad (2)$$

式中: B 为本振光幅值; φ_0 为初始相位。

在入纤位置处接收到的散射光与本振光随后进行相干拍频产生外差相干光的光场 $E_{co}(t)$ 为:

$$E_{co}(t) = [E_L(t)]^2 + [E_s(t)]^2 + 2 \times E_L(t) E_s(t) \quad (3)$$

外差相干光再经平衡光电探测器实现光电转换,所获得的拍频信号 $E(t)$ 为:

$$E(t) = 2B \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\alpha \frac{cd_k}{\eta_f}\right) \exp(j\Delta\omega t - \varphi_0) \text{rect}\left(\frac{t-d_k}{W}\right) \quad (4)$$

式中: $\Delta\omega$ 为声光调制器等移频器件所引入的移频量。在传统的相干探测 Φ -OTDR 中,由于移频量通常为单一值,使得拍频信号仅包含单一的特征频率,因而通常被视为单频探测 Φ -OTDR。

1.2 移频延时工作原理

为了有效抑制干涉衰落,可在 Φ -OTDR 系统中引入移频延时结构来产生不同频率与不同延时的探测光脉冲串,从而实现多频探测脉冲的空分复用与时分复用。在向传感光纤中注入多频探测脉冲之后,可在入纤位置处接收到多频 RBS 信号,其光场 $E_{MS}(t)$ 为:

$$E_{MS}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\alpha \frac{cd_k}{\eta_f}\right) \exp(j\omega(t + t_i - d_k)) \times \text{rect}\left(\frac{t + t_i}{W}\right) \quad (5)$$

式中: n 为多频探测脉冲数目; i 为多频探测脉冲序号; t_i 为第 i 个探测脉冲与第 1 个探测脉冲之间的相对延时。随后,多频 RBS 信号与本振光进行相干拍频所产生的拍频信号光场 $E_M(t)$ 为:

$$E_M(t) = 2B \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N A_k \exp\left(-\alpha \frac{cd_k}{\eta_f}\right) \times \exp(j\Delta\omega_i(t + t_i) - \varphi_0) \text{rect}\left(\frac{t - d_k}{W}\right) \quad (6)$$

式中: $\Delta\omega_i$ 为第 i 个探测脉冲的移频量。因此,不同频率的拍频信号之间可被视为相互独立的分量,之后可通过

带通滤波来分离出不同频率的拍频信号,并经数据对齐与数据聚合等运算处理有效提升衰落处的信号强度,从而为干涉衰落抑制奠定基础。

2 实验系统

基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 系统结构如图 1 所示。系统采用波长为 1 550 nm 的窄线宽激光器作为光源,其产生的连续激光经 1:99 光纤耦合器后分为两路。其中一路为功率占比 99% 的连续光,经半导体光放大器调制后成为高消光比高稳定的脉冲信号光^[15]。脉冲光经掺铒光纤放大器放大和密集波分复用器滤波后,再通过环形器注入传感光纤中。传感光纤末端连接光隔离器避免菲涅尔反射。传感光纤中返回的 RBS 光进入 2×2 光纤耦合器,并与 1:99 光纤耦合器所分出的功率占比 1% 的本振光进行相干拍频,随后由平衡探测器进行光电转换。为了产生多频探测脉冲,从密集波分复用器输出的脉冲光经 2×2 光纤耦合器进入由声光调制器、掺铒光纤放大器、延时光纤、光纤滤波器、光隔离器所构成的光纤移频延时环。在光纤移频延时环中,声光调制器进行脉冲光的移频,掺铒光纤放大器进行脉冲光的放大,延时光纤产生脉冲延时。经过移频的脉冲光会多次经 2×2 光纤耦合器重复进入光纤移频延时环,并由光纤滤波器控制进入传感光纤的激光频带范围。光隔离器可防止噪声信号进入环中对系统形成干扰。

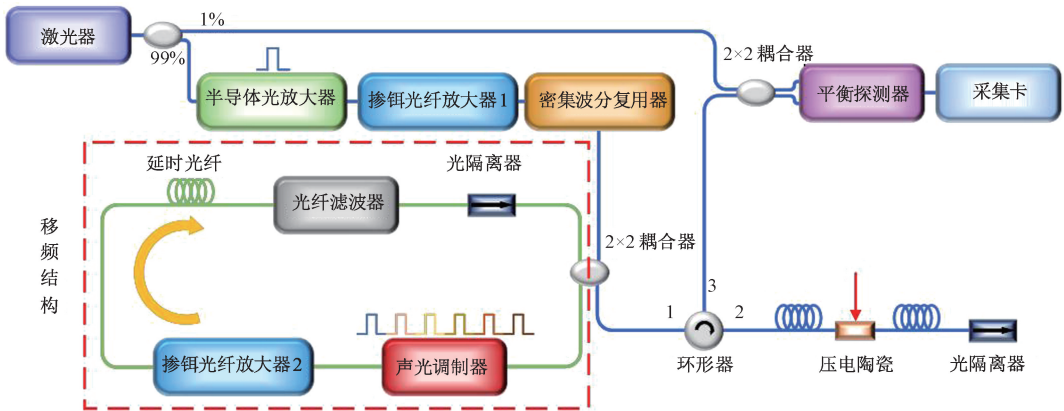


图 1 Φ -OTDR 实验系统结构

Fig. 1 Structure of the Φ -OTDR experimental system

实验中,传感光纤长度为 10.33 km,分别为利用压电陶瓷换能器连接的 10.1 km 光纤与 230 m 光纤。压电陶瓷换能器可向传感光纤施加固定频率的正弦信号以模拟外界振动。光纤移频延时环内,声光调制器的移频为 80 MHz,延时光纤长度为 44.5 m,光纤滤波器的通带范围为 11.25 GHz。信号发生器向脉冲光调制器提供脉宽为 200 ns 和重复频率为 8 kHz 的脉冲信号。采集卡的采样率设置为 1 GHz。

3 实验结果与分析

在光纤移频延时环中,声光调制器可以实现探测脉冲的重复移频而产生一系列的倍频信号,掺铒光纤放大器可用于补偿因探测脉冲在环内循环而损耗的光功率。延时光纤可用于实现不同频率脉冲的延时,从而避免脉冲混叠产生的非线性效应。光纤滤波器可以首先实现大

范围的滤波,并通过平衡探测器的带宽约束与采集卡采样频率的限制,进一步确定有效的通带范围。如图2所示,利用光纤移频延时环可产生多频探测脉冲串。其中,虚线为信号发生器提供的触发信号,实线为经多次循环移频与延时后的多频脉冲信号。第1个脉冲是由半导体光放大器直接调制而成的探测脉冲,其幅值为 $U_0 = 1.44$ V。由于半导体光放大器没有移频功能,因而第1个脉冲的中心频率为零频($f_0 = 0$ Hz)。第2个脉冲是由光纤移频延时环首次产生的探测脉冲。由于环内声光调制器的移频量为 80 MHz,光纤延迟线的长度为 44.5 m,因而第2个脉冲的中心频率为 $f_1 = 80$ MHz,且与第1个脉冲的延时为 $\Delta t = 0.46$ μ s。同时,由于环内掺铒光纤放大器的光功率补偿作用,第2个脉冲的幅度与第1个脉冲保持一致,其值为 $U_1 = 1.44$ V。随后在光纤环内循环移频延时产生的探测脉冲,均与前一个脉冲保持固定的延时,且相邻探测脉冲之间的频率差固定为 80 MHz。同时,由于环内掺铒光纤放大器可实现光功率的等比例放大,因而其余脉冲串中存在幅值的衰减趋势。

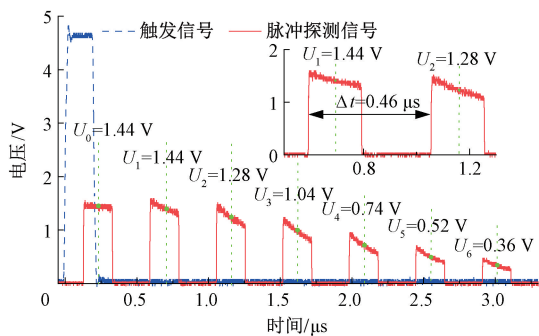


图2 多频探测脉冲信号时域图

Fig. 2 Time domain diagram of multi-frequency probe pulsed signal

利用光纤移频延时环所产生的多频探测脉冲光,通过环形器注入传感光纤。在传感光纤中,系统所激发出的多频 RBS 信号经示波器分析,所获得的频谱如图3所示。由图3可知,RBS 信号包含多个强度逐渐衰减的频率分量,依次对应于循环经过光纤移频延时环所产生的多频探测脉冲。由于系统采样率为 1 GHz,根据奈奎斯特采样定律可知,系统所能准确还原的信号带宽上限为 500 MHz。因此,系统仅选取对应 6 次移频的频带范围进行分析,其包含中心频率依次为 $f_1 = 80$ MHz、 $f_2 = 160$ MHz、 $f_3 = 240$ MHz、 $f_4 = 320$ MHz、 $f_5 = 400$ MHz、 $f_6 = 480$ MHz 这 6 个频率分量,且各个频率分量之间的频率差恒定为与环内声光调制器移频量相一致的 80 MHz。

多频 RBS 信号会与本振光信号在 2×2 光纤耦合器处进行相干拍频,从而可获得光功率放大后的拍频信号。由于本振光信号的中心频率为 0 Hz,信号外差所获取到

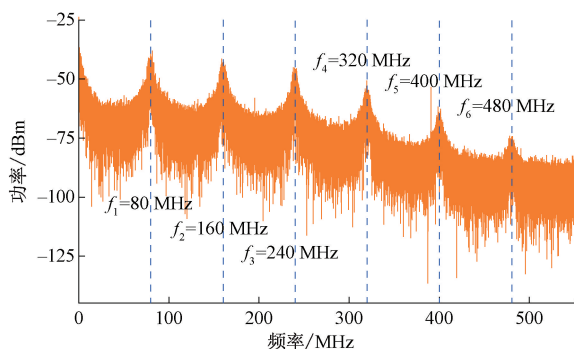


图3 多频 RBS 信号频谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of multi-frequency RBS signal

的拍频信号与 RBS 信号应保持一致的频率特征。因此,利用数字带通滤波器可从多频拍频信号中依次滤出对应于各个中心频率的单频信号。各个单频信号的频谱信息经叠加后如图4所示。由图4可知,各个频率分量均成功滤出且频率差恒定为 80 MHz。其中, $f_1 = 80$ MHz、 $f_2 = 160$ MHz、 $f_3 = 240$ MHz 的强度较为接近,而 $f_4 = 320$ MHz、 $f_5 = 400$ MHz、 $f_6 = 480$ MHz 的强度呈现衰减趋势。由于随后的信号聚合过程是将不同单频信号进行聚合,因而频率分量强度的差异对聚合结果影响较小。

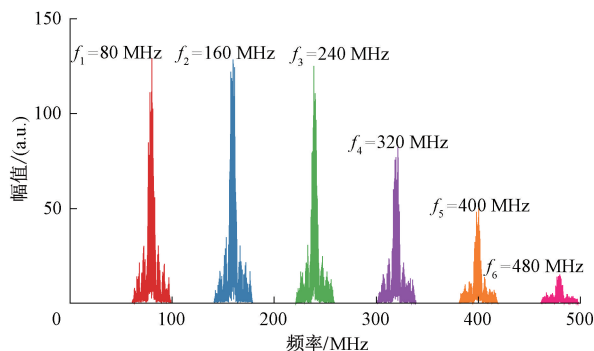
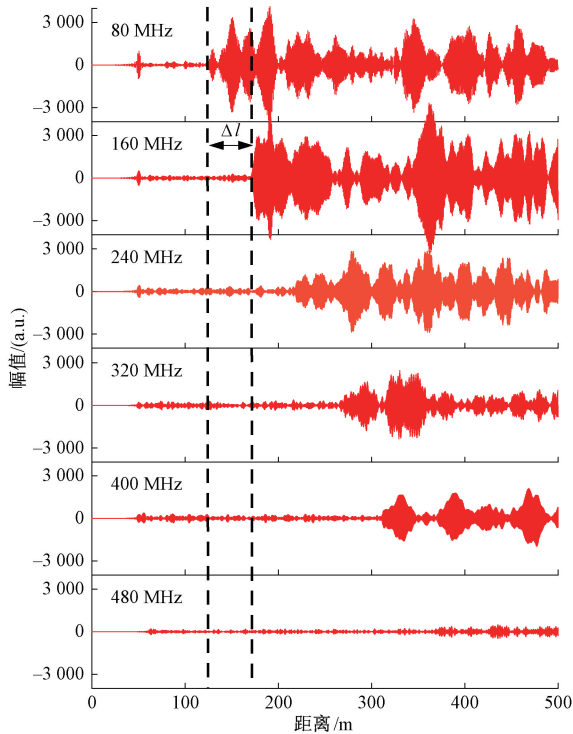


图4 多频拍频信号频谱叠加图

Fig. 4 Superimposed spectrum diagram of multi-frequency beat signal

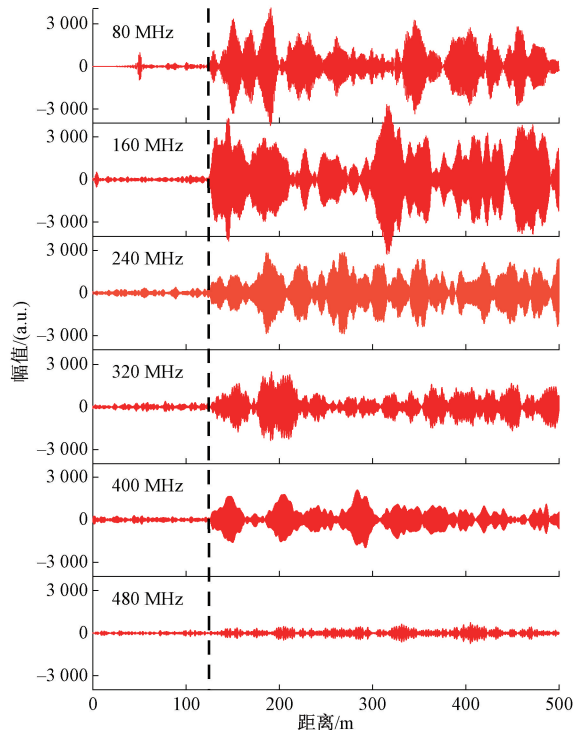
为了通过频率分集达到干涉衰落抑制的目的,系统需要将带通滤波之后的各个单频拍频信号进行聚合来提升衰落位置处的信号强度。图5所示为 6 个单频拍频信号的时域叠加图,并对传感光纤始端 500 m 以内的时域信号进行了放大分析。由图5(a)可知,6 个单频拍频信号所存在的延迟是由多频探测脉冲在光纤移频延时环中循环经过延时光纤所产生。由于延时光纤长度不变,因而单频拍频信号间的延迟距离也近似等于一个固定值 Δl 。由于 Φ -OTDR 系统在幅值与相位解调过程中需要准确选取振动区间,所以具有延时的单频拍频信号无法通过信号聚合来实现振动信号的准确解调。因此,系统需

要在信号聚合之前对各个单频拍频信号进行脉冲延时补偿,从而达到数据对齐的目的。



(a) 未对齐的单频拍频信号时域图

(a) Misaligned time-domain diagram of single-frequency beat signal



(b) 经数据对齐处理多频探测脉冲拍频曲线

(b) Multi-frequency detection pulses beat curves after data alignment processing

图 5 拍频信号时域图

Fig. 5 Time-domain diagram of beat signal

针对单频拍频信号的数据不对齐问题,系统可基于多频探测脉冲在延时光纤中的传输时间而获得各个单频拍频信号的延迟距离,计算公式如下:

$$\Delta l = \frac{c\Delta t}{2\eta_f} \quad (7)$$

式中: Δl 为单频拍频信号间的延迟距离; Δt 为多频探测脉冲间的延时。而为了进一步实现数据对齐,需要对各个单频拍频信号进行延时补偿,通过信号所有采样点的整体左移与尾端补零,可实现拍频信号的数据对齐。延时补偿采样点数目的计算过程如下:

$$\frac{n_d}{\Delta l} = \frac{n_s}{l_s} \quad (8)$$

式中: n_s 为 80 MHz 单频拍频信号的采样点数; l_s 为传感光纤长度; n_d 为待求的延时补偿采样点数。如图 5(b) 所示,利用延时补偿算法对单频拍频信号进行数据对齐后,不同信号之间的延迟已得到消除,且各个单频拍频曲线存在相近的变化趋势,从而实现了数据对齐。

经数据对齐后的单频拍频信号便可以通过正交解调来获得幅值与相位信息。其中,幅值信号聚合是实现干涉衰落抑制,进而获取振动位置的关键环节。信号聚合的主要方法包括直接求和法和旋转矢量求和法。由于拍频信号是一种矢量信号,矢量之间的相位角差是决定矢量和的决定性因素。直接求和法是两个信号直接求和的结果。当两个矢量之间的相位角差小于 90° 时,矢量强度将通过求和而增强。当两个矢量之间的相位角差超过 90° 时,两个矢量的总和可能小于单个矢量。因此,拍频信号强度的直接求和可能会削弱其自身的强度,难以达到抑制干涉衰落的目的。

旋转矢量求和法是指将要求和的矢量在一个方向上旋转并求和^[16],原理如图 6 所示。首先计算并归一化每个向量的共轭,然后通过乘以每个向量的归一化共轭将原始向量旋转到零相位。当所有矢量旋转到零相位时,可以通过求和计算信号强度的最大值。对于任何矢量信号,该方法可以获得任何矢量求

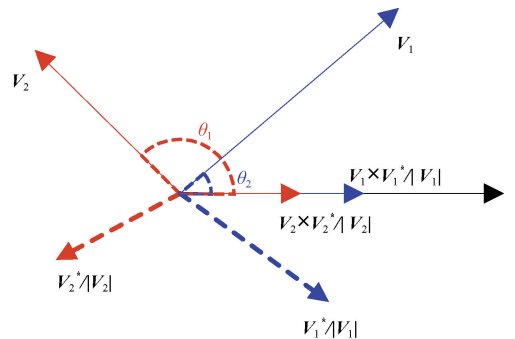
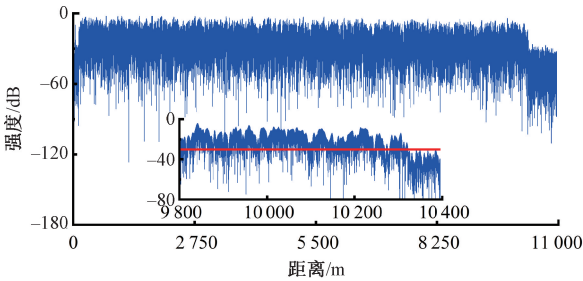


图 6 旋转矢量求和法原理

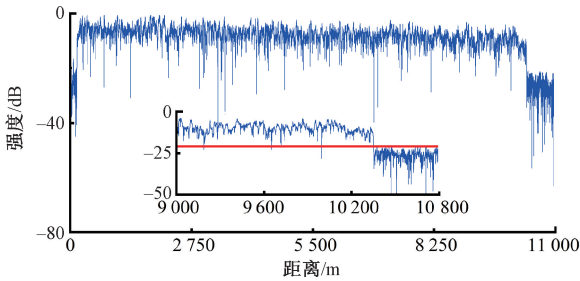
Fig. 6 Schematic diagram of the rotated-vector-sum method

和的最大强度。因此本文采用旋转矢量和方法对各个单频拍频信号进行聚合,从而实现传感光纤沿线拍频信号幅值的最大化。

为了验证数据对齐与数据聚合后, Φ -OTDR 系统干涉衰落的抑制情况,对各个单频拍频信号幅值曲线做归一化处理,并与聚合后的多频幅值曲线进行对比分析。图 7(a)所示为 80 MHz 单频拍频信号的归一化幅值曲线,图 7(b)所示为 6 个单频拍频信号经旋转矢量求和法聚合后的归一化幅值曲线。



(a) 80 MHz 拍频信号归一化幅值曲线
(a) Normalized amplitude curve of 80 MHz beat signal



(b) 多频聚合拍频信号归一化幅值曲线
(b) Normalized amplitude curve of multi-frequency aggregated beat signal

图 7 归一化幅值曲线对比

Fig. 7 Comparison diagram of normalized amplitude curves

由图 7 可知,为了统一评估干涉衰落的抑制效果,设置传感光纤尾端之外的背景噪声强度为衰落判断强度阈值,并利用横线进行标注。经测量可得,80 MHz 单频拍频信号的衰落判断强度阈值约为 -27 dB,聚合信号的衰落判断强度阈值约为 -21 dB。在此基础上,强度小于衰落判断强度阈值的采样点可被视为衰落点,定义衰落概率为衰落点数目与单条拍频信号采样点总数的比值。由此,可计算得到 80 MHz 单频拍频信号的衰落概率为 26.43%,并类似地可得到其余 5 个单频拍频信号幅值曲线的衰落概率依次为 23.89%、24.48%、24.86%、22.83% 和 24.15%。此外,多频聚合拍频信号的幅值曲线衰落概率可从最高时的 26.43% 降低至 0.93%。因此,基于光纤移频延时环的多频探测 Φ -OTDR 系统,经数据对齐与数据聚合处理后,已实现了干涉衰落的有效抑制,从而为振动信号的准确解调奠定了基础。

为了验证系统对于振动信号解调的有效性,在压电陶瓷换能器上施加频率为 200 Hz 且幅值为 3 V_{pp} 的正弦驱动信号。在多频聚合拍频信号基础上,采用正交解调算法可获取到相应的幅值曲线,并利用移动差分算法可得到振动定位曲线^[17],如图 8 所示。由图 8 可知,当脉冲宽度为 200 ns 时,在长度为 10.33 km 的传感光纤上可以实现信噪比为 5.29 dB 且空间分辨率为 20 m 的振动定位。

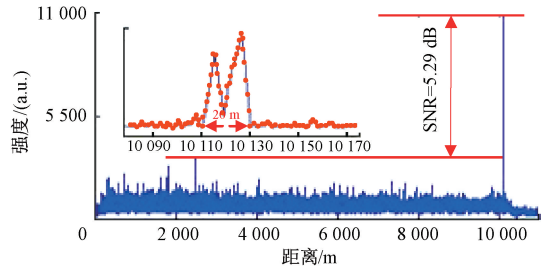


图 8 振动定位曲线

Fig. 8 Vibration location curve

与此同时,在振动区间处经相位解调与信号平滑处理可得到振动信号相位曲线,如图 9 所示。其中,图 9(a)为解调后的相位曲线,图 9(b)为功率谱密度曲线。由图 9 可知,系统可实现振动信号的相位解调,而根据功率谱密度曲线可得在 200 Hz 的振动频率处解调信号比噪声信号高 14.82 dB。

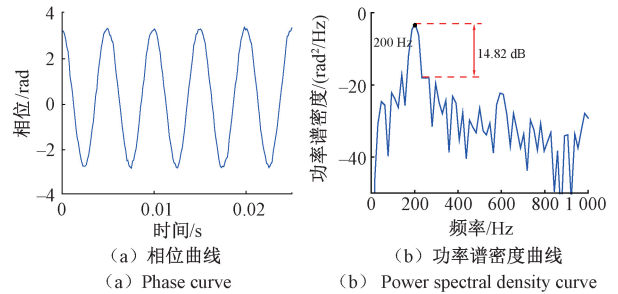


图 9 解调后的振动信号

Fig. 9 Demodulated vibration signal

随后,针对不同强度的振动信号,开展传感系统重复性实验。调节施加在压电陶瓷换能器上的驱动电压幅值,并通过信号解调获取相位曲线的幅值,进而开展曲线拟合分析,如图 10 所示。由图 10 可知,当驱动电压幅值在 1~10 V 变化时,解调后的相位曲线幅值在 1.025~9.767 rad 变化,且两者呈现较好的线性关系,其相关系数为 0.997。因此,系统可在有效抑制干涉衰落的基础上,具有线性稳定的外界振动信号解调能力。

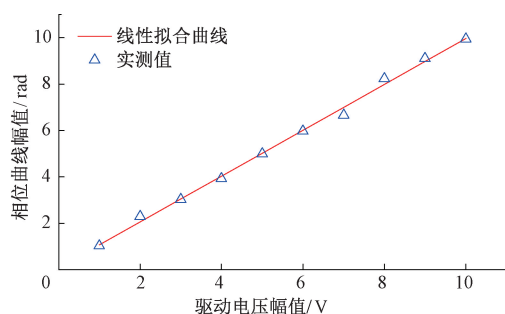


图 10 相位解调性能曲线拟合

Fig. 10 Fitting diagram of phase demodulation performance curve

4 结 论

本文针对制约 Φ -OTDR 相位解调准确性的干涉衰落问题,提出了一种基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 系统结构。利用光纤环内移频、放大、延时、滤波、隔离等器件,简便稳定地产生了多频延时探测光脉冲,解决了传统方案中频率分量数目有限且不易拓展的难题。系统还采用脉冲延时补偿算法与旋转矢量求和算法实现了多频瑞利散射拍频信号的数据对齐与数据聚合。实验结果表明,基于光纤移频延时环的 Φ -OTDR 系统可实现从最高时的 26.43% 降低至 0.93% 的幅值曲线衰落概率,以及在 10.33 km 传感光纤上相关系数为 0.997 的振动信号线性解调,从而为 Φ -OTDR 系统向实际传感应用的推广提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] 王大伟,封皓,杨洋,等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 830-837.
WANG D W, FENG H, YANG Y, et al. Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 830-837.
- [2] WANG Y, YUAN H Y, LIU X, et al. A comprehensive study of optical fiber acoustic sensing[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85821-85837.
- [3] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.
ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Time-frequency domain based hybrid feature extraction algorithm for fiber optic sensing events recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 184-190.
- [4] 单一男,马智锦,曾旭,等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 1-9.
SHAN Y N, MA ZH J, ZENG X, et al. Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 1-9.
- [5] LU Y, ZHU T, CHEN L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [6] HEALEY P. Fading in heterodyne OTDR [J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.
- [7] LU L D, SONG Y J, ZHU F, et al. Coherent optical time domain reflectometry using three frequency multiplexing probe [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(12): 1735-1739.
- [8] ZHOU J, PAN Z Q, YE Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a Φ -OTDR with a multi-frequency source [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] ZABIHI M, CHEN Y S, ZHOU T, et al. Continuous fading suppression method for Φ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [12] WU Y, WANG Z N, XIONG J, et al. Interference fading elimination with single rectangular pulse in Φ -OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3381-3387.
- [13] WANG Y, LI Y, XIAO L, et al. Interference fading

- suppression using active frequency transformation method with auxiliary interferometer feedback [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 872-879.
- [14] ZHANG Y X, LIU J X, XIONG F, et al. A space-division multiplexing method for fading noise suppression in the Φ -OTDR system [J]. Sensors, 2021, 21(5): 1694.
- [15] 薛博, 白清, 张瑜, 等. 高消光比脉冲光调制提升 BOTDR 系统性能研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 84-89.
- XUE B, BAI Q, ZHANG Y, et al. Research on improving performance of BOTDR system using high extinction ratio pulse modulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 84-89.
- [16] CUI K X, LIU F, WANG K R, et al. Interference-fading-suppressed pulse-coding Φ -OTDR using spectrum extraction and rotated-vector-sum method [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(6): 1-6.
- [17] 王鹏飞, 董齐, 刘昕, 等. 基于 Φ -OTDR 的煤层气管线外界入侵振动检测系统 [J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 144-149.

WANG P F, DONG Q, LIU X, et al. Coalbed methane transport pipeline intrusion detection system based on Φ -OTDR [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 144-149.

作者简介



王宇, 2014 年于 Cergy-Pontoise University 获得博士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: wangyu@tyut.edu.cn

Wang Yu received his Ph. D. degree from Cergy-Pontoise University in 2014. He is currently an associate professor at Taiyuan University of Technology. His main research interest is optical fiber sensors.



靳宝全 (通信作者), 2010 年于太原理工大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: jinbaoquan@tyut.edu.cn

Jin Baoquan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Taiyuan University of Technology in 2010. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Taiyuan University of Technology. His main research interest is optical fiber sensors.