

基于希尔伯特-黄变换的双马赫-曾德分布式光纤传感振动定位方法

杨文晨 秦增光 刘兆军 徐演平 李钊 渠帅 丛振华 王泽群

A Hilbert-Huang transform method for vibration localization based on a dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensor

YANG Wen-chen, QIN Zeng-guang, LIU Zhao-jun, XU Yan-ping, LI Zhao, QU Shuai, CONG Zhen-hua, WANG Ze-qun

引用本文:

杨文晨, 秦增光, 刘兆军, 徐演平, 李钊, 渠帅, 丛振华, 王泽群. 基于希尔伯特-黄变换的双马赫-曾德分布式光纤传感振动定位方法[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1410-1416. doi: 10.37188/CO.2021-0065YANG Wen-chen, QIN Zeng-guang, LIU Zhao-jun, XU Yan-ping, LI Zhao, QU Shuai, CONG Zhen-hua, WANG Ze-qun. A Hilbert-Huang transform method for vibration localization based on a dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1410-1416. doi: 10.37188/CO.2021-0065在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0065>**您可能感兴趣的其他文章****Articles you may be interested in****光纤生物传感器在HER3抗体药物定量检测中的应用**

Application of optical fiber biosensor in quantitative detection of HER3 antibody

中国光学. 2018, 11(3): 503 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0503>**基于线结构光传感器的轨道板几何形貌检测方法**

A detection method based on line-structured light sensor for geometrical morphology of track slab

中国光学. 2018, 11(5): 841 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0841>**基于小波神经网络的光纤陀螺误差补偿方法**

A fiber optic gyro error compensation method based on wavelet neural network

中国光学. 2018, 11(6): 1024 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1024>**20~1 250 Hz 光纤激光加速度传感系统设计**

20-1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system

中国光学. 2017, 10(4): 469 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0469>**飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性**

Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics

中国光学. 2017, 10(4): 449 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0449>**采用超连续谱激光的双光束光纤光阱实验**

Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser

中国光学. 2017, 10(3): 370 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0370>

文章编号 2095-1531(2021)06-1410-07

基于希尔伯特-黄变换的双马赫-曾德分布式 光纤传感振动定位方法

杨文晨^{1,2}, 秦增光^{1,2*}, 刘兆军^{1,2}, 徐演平³, 李 钊^{1,2}, 渠 帅^{1,2}, 丛振华^{1,2}, 王泽群^{1,2}

(1. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

2. 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

3. 山东大学 激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要:双马赫-曾德(M-Z)干涉仪系统因其光路简单、灵敏度高、频率响应宽等独特优势受到了广泛的关注及应用,但由于其非常容易受到外界环境噪声的影响,直接采取互相关计算方法获取扰动信号位置会导致较大的测量误差。本文提出了一种基于希尔伯特-黄变换(HHT)的数据信号处理方案用于实现高精度的分布式光纤振动定位检测。通过对接收到的两路光信号进行经验模态分解得到本征模函数,并对所有本征模函数进行希尔伯特变换叠加得到希尔伯特谱,从而可以清晰直观地提取到由振动信号引起的高相似度光信号信息,再通过互相关计算由振动信号引起的时间延迟,从而准确计算振动位置信息。相比于传统的直接互相关计算方法,本方法可以有效识别及提取双M-Z干涉仪系统中振动信号引起的特征信息,从而可以有效降低外界环境噪声对系统的影响,减小定位误差。本文对所提出的方法进行了相关理论分析,并搭建了双M-Z干涉仪系统进行相关实验验证。实验结果表明,与传统直接互相关方法相比,本方法可以有效减少互相关数据的计算量,同时该方法可以有效提高振动位置的定位精度,在2 km的传感光纤长度、10 MHz采样率下,定位精度可达10 m。本文提出的基于双马赫-曾德干涉仪系统的分布式光纤传感技术具有较高的实际应用价值。

关键词:光纤传感; 希尔伯特-黄变换; 双马赫-曾德干涉仪; 定位方法; 端点检测

中图分类号: TP212.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0065

A Hilbert-Huang transform method for vibration localization based on a dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensor

YANG Wen-chen^{1,2}, QIN Zeng-guang^{1,2*}, LIU Zhao-jun^{1,2}, XU Yan-ping³, LI Zhao^{1,2}, QU Shuai^{1,2},
CONG Zhen-hua^{1,2}, WANG Ze-qun^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, Qingdao 266237, China;

3. Ministry of Education Key Laboratory of Laser and Infrared System Integration Technology,
Shandong University, Qingdao 266237, China)

* Corresponding author, E-mail: qinzengguang@sdu.edu.cn

Abstract: The dual Mach-Zehnder interferometer system has received extensive attention and applications due to its unique advantages such as simple optical path, high sensitivity and wide frequency response.

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-04-27

基金项目: 山东省自然科学基金(No. ZR2020MF110, No. ZR2020MF118)

Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2020MF110, No. ZR2020MF118)

However, it is very susceptible to external environmental noise and direct cross-correlation calculation method will lead to a large error. This paper proposes a data signal processing scheme based on Hilbert-Huang Transform (HHT) to realize high-precision distributed optical fiber vibration position detection. In this method, the eigenmode function is obtained by the empirical mode decomposition of the two received optical signals. The Hilbert transform and superposition of all eigenmode functions are performed to obtain the Hilbert spectrum, which can be clearly and intuitively extracted. It can accurately calculate the vibration position information by calculating the time delay caused by the vibration signal through cross-correlation. Compared with the traditional direct cross-correlation calculations, this method can effectively identify and extract the characteristic information caused by the vibration signal in the dual M-Z system. Thereby it can effectively reduce the impact of external environmental noise on the system and reduce the positioning error. This paper analyzes the related theory of the proposed method and builds a dual M-Z system for related experimental verification. The experimental results show that, compared with the traditional direct cross-correlation method, this method can effectively reduce the amount of calculation of cross-correlation data. At the same time, it can effectively improve the positioning accuracy of the vibration position. Under 10 MHz sampling rate, the positioning accuracy can reach 10 m. Therefore, the distributed optical fiber sensing technology based on the dual Mach-Zehnder interferometer system proposed in this paper has high application value.

Key words: optical fiber sensing; Hilbert-Huang transform; dual Mach-Zehnder interferometer; positioning method; endpoint detection

1 引言

近年来,光纤通信技术发展迅速并且得到广泛应用,光纤传感技术也受到了广泛的关注,在越来越多的领域得以应用,大型建筑、桥梁、管道的安全监测,飞机、高铁的运行安全监测,电缆的温度监测,周界安全的防护监测,海底地质灾害预测,甚至石油产业、电力行业、机械加工及医疗行业等领域都与其息息相关^[1-6]。作为光纤传感领域最重要的一类,分布式光纤传感主要分为基于后向散射光的分布式光纤传感系统和基于干涉仪结构的分布式光纤传感系统。基于后向散射的分布式光纤传感系统又根据后向散射光的不同,可以分为拉曼光时域反射计(Raman Optical Time Domain Reflectometer, R-OTDR)、布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, B-OTDR)和相位敏感型光时域反射计(Phase-sensitive Optical Time Domain Reflectometer, φ -OTDR)。基于干涉仪结构的分布式光纤传感系统根据其装置的不同可分为萨格纳克(Sagnac)干涉仪、马赫-曾德(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪和

迈克尔逊(Michelson)干涉仪。

基于后向散射型的分布式光纤传感技术原理是当光纤中的光受到外界扰动时会产生相移,使经过耦合器的光的干涉状态发生改变。光电探测器可以把光信号转化成电信号进行信号采集,对采集信号进行处理即可得到扰动信息。然而,基于后向散射光的光纤传感系统对光源、探测器等硬件要求较高,光路较为复杂,成本较高。同时,受脉冲重复频率的限制,其在长距离传感中可测量的频率响应范围较低,这也极大地限制了其在实际中的应用。

干涉型分布式光纤传感系统可以弥补后向散射型分布式光纤传感系统的缺点。同时,干涉型分布式光纤传感系统具有频率响应宽、对光源要求较低、光路较为简单、成本低等优势。其中,基于双 M-Z 结构的分布式光纤传感系统因其相位敏感性高、响应速度快、定位精确,逐渐成为分布式光纤传感系统的研究热点,并已在周界安全防范、石油管道安全预警、输电网安全监控及海底线缆监控等领域有广泛的应用^[7]。国内外有关公司已对定位系统产品进行设计及应用,但由于

定位精度低,很难进行大面积推广。随着双 M-Z 应用需求的逐渐增加,对其定位精度也有了越来越高的要求。

传统的双 M-Z 振动定位方法是直接对信号做互相关运算,通过计算时延得到振动位置,陈伟民等使用传统 M-Z 振动定位方法在长 20 km 光缆、10 MHz 采样率下进行计算,定位误差为 149 m^[8]。直接互相关计算会把大量的噪声信息也计算其中,使得振动定位精度下降。此外,在信号中难以确定振动起始点也会对精度和处理时间带来不利的影响^[9-11]。为了提高双 M-Z 振动系统的定位精度,陈沁楠等采用过零率得到扰动的起始点,并通过互相关算法处理,在 2.25 km 光纤实现了±20 m 定位精度^[7]。该方法的准确度过于依赖于对过零窗口大小的选择,窗口选择较大会引入噪声误差,反之则会丢失重要信息。马春宇等采用双波长 M-Z 系统结合连续小波变换技术通过提取采集信号包络寻找瞬时频率较高部分以减小定位误差,在 85 km 的传感光纤上平均误差为 24.3 m^[12]。谢尚然等采用离散小波寻找振动起始点进行定位,在长度为 30.498 km、2 MHz 采样率下,定位误差达 50 m^[13]。然而由于小波分析的结果主要取决于小波变换的基本功能,无法以相同的精度对时间或频率相关信息进行准确分析。因此寻找有效的检测方法不仅可以提高定位精度,而且可以减少处理时间,对于干涉仪分布式光纤传感具有重要意义。上述研究的定位精度还需要提高,限制了其应用。

为了实现高精度的振动定位,本文提出了一种基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)的双 M-Z 型分布式光纤传感振动定位方法。通过 HHT 方法,可以准确判断瞬时高频率信息,从而提高互相关计算的准确度,减小双 M-Z 传感系统误差。

2 实验系统及原理

双 M-Z 型分布式光纤传感实验系统装置图如图 1 所示,由两个 M-Z 干涉仪按照顺时针和逆时针方向组合而成。光源发出的光经隔离器到达耦合器 C1 分为两束,其中一束光经耦合器 C2 分为两束后进入传感光纤的两个干涉臂,在耦合器 C3 处干涉,并经传导光纤进入耦合器 C4 被光电

探测器 PD2 接收;另一束光经耦合器 C4 进入传导光纤,在经过耦合器 C3 进入干涉仪的两个干涉臂,两束光在耦合器 C2 处发生干涉,被探测器 PD1 接收。两个探测器把探测到的光信号转为电信号后进入采集处理系统进行定位计算。

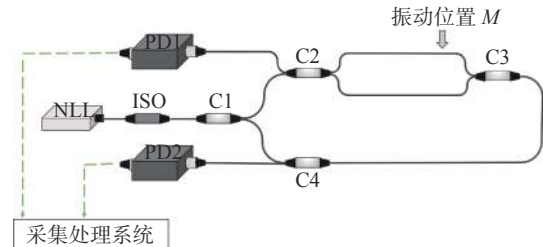


图 1 双 M-Z 分布式光纤传感系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dual M-Z distributed optical fiber sensor

当有振动作用在 M 点时,携带振动的信号沿光纤顺时针和逆时针方向到达两个探测器存在时间延迟 τ :

$$\tau = t_{L-x} + t_L - t_x \quad (1)$$

式中, t_{L-x} 为信号从振动位置传播到耦合器 C3 的时间, t_L 为振动信号经过传导光纤到达探测器 PD1 的时间, t_x 为振动信号从振动位置传到探测器 PD2 的时间。从而可以计算出振动的位置:

$$x = \frac{2L - \tau \cdot c/n}{2} \quad (2)$$

式中, L 为传感光纤和传导光纤的长度, τ 为顺逆两束光到达平衡探测器间的时间延迟, c 为真空中的光速, n 为光纤折射率, x 为振动位置 M 到耦合器 C1 的距离。

由于两路探测器探测到的振动信号是由同一振动源产生,因此两路信号具有高度的相关性,通过对两路信号做互相关运算可以得出时间延迟 τ ,进而可以得到扰动位置。

分布式光纤传感技术中空间分辨率是衡量一个系统性能优良的关键指标。光干涉后被两个光电探测器接收,光信号转化为电信号,后将电信号经过采集卡采样之后送入计算机进行处理。基于非对称双 M-Z 结构的光纤扰动传感利用两路干涉信号的时延计算扰动位置。因此,采集卡的采样频率直接决定着传感器的理论定位精度。假设采样频率为 f_s , 此时相邻采样数据的时间间隔为 $\Delta = 1/f_s$, 任意时延均可以写成 $d = N\Delta t$ 的形式

(N 为正整数)。因此可以得到理想条件下传感器的空间分辨率为:

$$\Delta x = x[(N+1)\Delta t] - x(N\Delta t) = \frac{c}{2nf_s} \quad (3)$$

由于可以认为光纤折射率是不变的,因此定位空间分辨率只与采样率有关,采样率越高,理论空间分辨率就越高。本文使用的采集卡的采样率为 10 MS/s,因此,本文的理论空间分辨率为 10 m。

3 希尔伯特-黄变换算法

希尔伯特-黄变换包含经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和希尔伯特谱分析(Hilbert Spectrum Analysis, HSA)^[14-18]。

3.1 经验模态分解

EMD 的基本思想是把一个频率变化无规律的波转化成多个单一频率波+残余波的形式。具体是将一个原始信号 $x(t)$ 的极大值点用 3 次 Hermite 差值方式拟合出上包络线,再用同样的方式得出下包络线;上下包络线取均值,得到平均包络线,记为 pl ;用原始信号 $x(t)$ 减去平均包络线 pl ,得到一个新的信号 $m(t)$,即:

$$x(t) - pl = m(t) \quad (4)$$

若新信号 $m(t)$ 还存在负的局部极大值和正的局部极小值,则继续按上述操作分解,由此原始信号 $x(t)$ 分解为 n 个本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和余波 $r(t)$,可表示为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n I(k) + r(t) \quad (5)$$

IMF 满足以下两个条件:(1) 信号极值点的数量与零点数相等或者相差 1;(2) 由极大值定义的上包络和极小值定义的下包络的局部均值是零。

3.2 希尔伯特谱分析

信号 $x(t)$ 的希尔伯特变换 $y(t)$ 表示为:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} p \int \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (6)$$

式中, p 代表柯西主值,由此确定的解析信号为:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t) \exp(i\theta(t)) \quad (7)$$

式中, $a(t)$ 为瞬时幅值, $\theta(t)$ 为瞬时相位,由式(8)决定。

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}, \\ \theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)}. \end{cases} \quad (8)$$

相位函数求导得到信号的瞬时频率函数:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (9)$$

对所有 IMF 进行 Hilbert 变换,得:

$$H(f, t) = x(t) = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^n a_k(t) \exp(i2\pi \int f_k(t) dt) \quad (10)$$

这里省略了余波 $r(t)$, 式中, $H(f, t)$ 是随时间和频率变化的信号幅度。定义 Hilbert 谱:

$$h(f) = \int_0^T H(f, t) dt \quad (11)$$

其中, T 为采样长度, $h(f)$ 反映了信号的幅值在整个频率段上随频率的变化情况。

4 实验过程

搭建如图 1 所示的实验系统,采用 1550 nm 窄线宽激光器(NLL)作为传感光源,经过隔离器(ISO)后进入 50:50 耦合器分束,分别沿顺时针和逆时针方向传播,各自发生干涉后被光电探测器(PD)采集,进入采集处理系统进行数据分析。信号采集使用 NI PCI-5114 采集卡,通过 LabVIEW 采集信号,信号处理使用 Matlab 进行定位计算。采用的光纤为 2 km 双芯铠装光缆,抗环境噪声的能力较强,同时更适合实际应用。

实验中,在距离 C2 耦合器 1800 m 处用脚踩光纤的方式施加振动,采样率选用 10 MHz/s,采样时间为 0.1 s,振动时间选取 0.01 s。采集到的信号如图 2(彩图见期刊电子版)所示,可见两路信号具有很强的相关性。由于光纤的双折射因素、探测器增益带宽和光源噪声造成了两路信号大小的不一致。由于两路信号反映的都是同一振动源的振动,因此两路信号形状上具有高度相关性,通过互相关计算可以得到两路相关信号的时间延迟,这个结果主要考虑两路信号的形状相似度,信号幅值的大小对其影响较小。双 M-Z 的定位结果与得到的时间延迟有关,因此还是可以通过式(2)对振动位置最终进行定位。

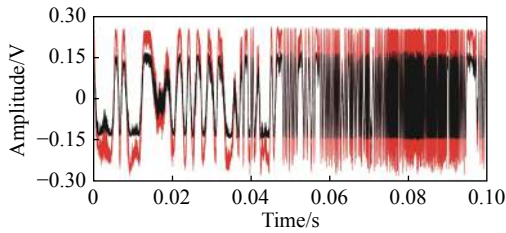


图 2 干涉信号时域图

Fig. 2 Time domain diagram of interference signal

该信号处理方法流程图如图 3 所示, 具体运算如下:

(1) 对振动光纤信号按分段 3 次 Hermite 差值多项式做 EMD, 得到 IMF, 分解层数选取 10 层, 如图 4 所示, 这里给出了 5 层分解。

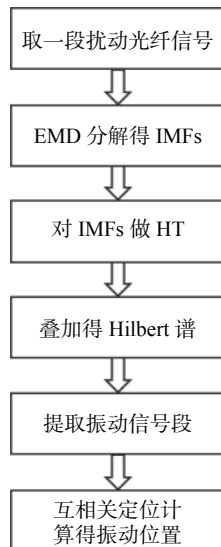


图 3 定位计算方法流程图

Fig. 3 Flow chart of positioning calculation method

(2) 对分解得到的每层 IMF 做 Hilbert 变换, 结果反映了原始信号的瞬时频率。

(3) 将所有 IMF 做 Hilbert 变换后的结果进行叠加, 得到 Hilbert 谱, 清晰直观地反映原始信号的频率变化情况, 如图 5 所示。

(4) 根据 Hilbert 谱峰值位置提取原始信号的信号段, 取最高峰值处附近 0.01 s 的数据做互相关运算及定位运算得出振动位置信息。从图 5 可以看出, 880000 采样点处频率最高, 选取 800000~900000 采样点处的区域信号作为振动的有效信号, 对此做互相关运算得出两路信号的时间延迟, 通过计算得出定位为 1810 m, 与实际振动位置 1800 m 相比, 误差为 10 m。

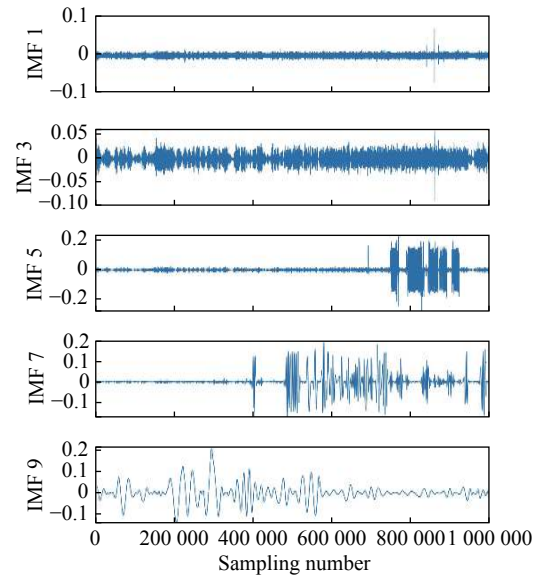


图 4 干涉信号 EMD 分解图

Fig. 4 EMD decomposition diagram of interference signal

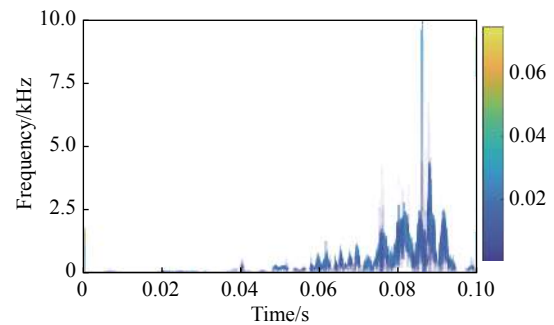


图 5 干涉信号的希尔伯特谱图

Fig. 5 Hilbert spectrum of interference signal

为了说明该方法的有效性, 分别取不同频率的区域信号做定位运算, 比较定位误差的大小, 如表 1 所示。通过对不同区域信号定位误差的对比可知, 本文所提出的定位方法比传统的直接互相关方法定位误差小, 同时利用该方法可精确定位出最优振动区域信号, 取高频段的信号定位误差比低频段信号定位误差小。

表 1 不同区域信号定位误差对比

Tab. 1 Comparison of signal positioning errors in different regions

Regional signal /s	Location error/m
0.05~0.06	-60
0.06~0.07	40
0.07~0.08	20
0.08~0.09	10
0.09~0.10	-30
0~0.10	30

5 结 论

本文利用 HHT 来确定振动的区域信号位置,从而提取出包含振动的有效区域信号,振动区域

为频率最高的信号区域,对该区域信号进行互相关运算,得出两路信号的时间延迟,再进行定位计算,减少了运算量,并且极大地提高了定位精度,在 2 km 的传感长度、10 MHz 采样率下,定位精度达 10 m。

参考文献:

- [1] ZHOU D W, DONG Y K, WANG B ZH, *et al.*. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 32.
- [2] QU SH, QIN Z G, XU Y P, *et al.*. Distributed sparse signal sensing based on compressive sensing OFDR[J]. *Optics Letters*, 2020, 12(45): 3288-3291.
- [3] WANG B ZH, FAN B H, ZHOU D W, *et al.*. High-performance optical chirp chain BOTDA by using a pattern recognition algorithm and the differential pulse-width pair technique[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(6): 652-658.
- [4] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.
GAO X, LI SH H, MA Q L, *et al.*. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752. (in Chinese)
- [5] 吴妮珊, 夏历. 基于微波光子学的准分布式光纤传感解调技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 245-263.
WU N SH, XIA L. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese)
- [6] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [7] CHEN Q N, LIU T G, LIU K, *et al.*. An improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 1954-1960.
- [8] 陈伟民, 吴俊, 谭靖, 等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2128-2132.
CHEN W M, WU J, TAN J, *et al.*. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2128-2132. (in Chinese)
- [9] LIU K, MA P F, AN J CH, *et al.*. Endpoint detection of distributed fiber sensing systems based on STFT algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 114: 122-126.
- [10] 刘琨, 何畅, 刘铁根, 等. 一种用于光纤周界安防系统的端点检测方法[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(11): 2136-2140.
LIU K, HE CH, LIU T G, *et al.*. An endpoint detection method for fiber perimeter security system[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(11): 2136-2140. (in Chinese)
- [11] 吴红艳, 贾波, 卞鹿. 光纤周界安防系统端点检测技术的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(4): 743-748.
WU H Y, JIA B, BIAN P. Study on endpoint detection technology based on fiber perimeter security system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 743-748. (in Chinese)
- [12] MA CH Y, LIU T G, LIU K, *et al.*. A continuous wavelet transform based time delay estimation method for long range fiber interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 3785-3789.
- [13] 谢尚然, 邹琪琳, 屠亦军, 等. 长距离双M-Z干涉型振动传感器实时定位算法研究[J]. *光电子·激光*, 2009, 20(8): 1020-1024.
XIE SH R, ZOU Q L, TU Y J, *et al.*. A study on real-time location method for long distance dual M-Z interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(8): 1020-1024. (in Chinese)
- [14] YAN R Q, GAO R X. Hilbert-Huang transform-based vibration signal analysis for machine health monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(6): 2320-2329.
- [15] 赵亮, 刘海, 徐世昌, 等. HHT和CWT用于光纤振动信号分析的对比研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 260-264.
ZHAO L, LIU H, XU SH CH, *et al.*. Comparison study of optical fiber vibration signals using HHT and CWT[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 260-264. (in Chinese)
- [16] 宋宇, 游海龙, 翁新武, 等. 基于希尔伯特-黄变换的信号处理方法[J]. *长春工业大学学报*, 2015, 36(4): 374-378.
SONG Y, YOU H L, WENG X W, *et al.*. Research on signal processing method based on Hilbert-Huang transform[J].

Journal of Changchun University of Technology, 2015, 36(4): 374-378. (in Chinese)

- [17] 贺龙周, 孙捷. 基于分布式传感光纤的模式识别及定位技术[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(6): 95-99.
HE L ZH, SUN J. Pattern recognition and position technology based on distributed sensing fiber[J]. *Computer Systems & Applications*, 2019, 28(6): 95-99. (in Chinese)
- [18] 苏鹏, 陈彦江, 闫维明. 基于HHT方法的桥梁振动时频分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(4): 160-166.
SU P, CHEN Y J, YAN W M. Time-frequency analysis of bridge vibration based on HHT method[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2019, 41(4): 160-166. (in Chinese)

作者简介:



杨文晨(1997—), 男, 山东泰安人, 山东大学信息科学与工程学院光学工程专业硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感技术研究。E-mail: 201932512@mail.sdu.edu.cn



秦增光(1984—), 男, 山东烟台人, 副教授, 硕士生导师, 2013年于渥太华大学获得博士学位, 主要从事分布式光纤传感技术的研究, 特别是光时域反射仪技术和光频域反射仪技术。E-mail: qinzengguang@sdu.edu.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:100.00 元/册