DOI: 10. 13382/j. jemi. B2206124

基于伯格算法的双马赫-曾德干涉光纤传感系统*

王华阳 王 宇 杨佳沛 刘 昕 白 清 靳宝全

(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)

摘 要:针对双马赫-曾德干涉型光纤振动传感系统定位误差较大的问题,提出了一种基于伯格算法的振动定位方法。利用频 谱分析法比较伯格算法与快速傅里叶变换算法在不同频数下的能量特征,通过能量比计算确定最优频数,并进行伯格算法最优 阶数的选值分析。在最优频数与最优阶数条件下提取特征数据帧,通过互相关计算获取双路振动信号之间的时延,进而获得振 动位置。在双马赫-曾德干涉光纤振动传感系统中,开展了振动定位实验研究。实验结果表明,在 2.2 km 的传感光纤上,本方 法能顺利提取出振动信号频率的特征数据帧,且振动定位绝对误差为 7.3 m,为提升双马赫-曾德干涉光纤传感系统定位精度提 供了新方法。

Dual Mach-Zehnder interferometric optical fiber sensing system based on Burg algorithm

Wang Huayang Wang Yu Yang Jiapei Liu Xin Bai Qing Jin Baoquan

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem of large positioning error of dual Mach-Zehnder interferometric optical fiber vibration sensor system, a vibration positioning method based on Burg algorithm is proposed. The spectral analysis method is used to compare the energy characteristics of the Burg algorithm and the fast Fourier transform algorithm at different frequencies. The optimal frequency is determined by calculating the energy ratio, and the value selection analysis of the optimal order of the Burg algorithm is carried out. Under the conditions of optimal frequency and order, feature data frames are extracted, and the time delay between two vibration signals is obtained through cross correlation calculation, so as to obtain the vibration position. In the dual Mach-Zehnder interferometric optical fiber vibration sensor system, the experimental research on vibration location is carried out. The experimental results show that the method can successfully extract the characteristic data frame of vibration signal frequency on the 2.2 km sensing optical fiber, and the absolute error of vibration location is 7.3 m, which provides a new method to improve the positioning accuracy of the dual Mach-Zehnder interferometric optical fiber sensing system.

Keywords: optical fiber vibration sensing; Burg algorithm; dual Mach-Zehnder interferometric; positioning method

0 引 言

光纤振动传感技术具有分布式测量、铺设简单、本质 安全、灵敏度高等优点,已成为周界安防的重要手段,并 广泛应用在文物古迹、高速公路、高速铁路等重要场 所^[14]。目前,干涉型光纤振动传感器在响应速度、动态 测量范围、灵敏度等性能参数方面均有较大优势。其中, 双马赫-曾德(Mach-Zehnder,M-Z)干涉光纤振动传感系 统具有成本低廉、易于实现、检测灵敏度高等优点,是光

收稿日期: 2022-12-14 Received Date: 2022-12-14

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

纤周界安防领域的重要技术。但传统的振动定位方法误差较大,且易受到环境噪声影响。近年来,随着双 M-Z 干涉技术在实际应用中的需求增大,如何进一步降低定 位误差受到了国内外学者的广泛关注。

传统的双 M-Z 干涉光纤振动传感系统的定位方法 为直接互相关算法,通过计算两路信号的时间延迟确定 扰动位置^[5-6]。2002年波兰华沙军事科技学院 Kizlik 等^[7]提出了双 M-Z 干涉光纤扰动定位技术。2007 年重 庆大学陈伟民等^[8]使用传统方法在 20 km 光缆与 10 MHz 采样率下,定位误差为 149 m。2012 年杭州电子 科技大学潘岳等^[9]分析了影响双 M-Z 传感定位系统的 因素,如光源噪声、偏振态退化、定位算法等。2015年厦 门大学 Chen 等^[10] 采用过零率方法确定扰动的初始位 置,并利用互相关算法在 2.25 km 的光纤上实现了±20 m 的定位精度。2017年西南交通大学杨顺智等[11]通过二 次互相关算法,减小了噪声带来的误差,降低了系统的定 位误差。2018年西安邮电大学申欢等[12]提出了一种分 级互相关定位方法,在保证定位精度的情况下,缩短了时 间,提高了定位效率。2016年天津大学 Ma 等^[13]采用双 波长 M-Z 干涉系统结合小波变换技术,通过寻找信号瞬 时频率较高的数据,在85km传感光纤上的平均误差为 24.3 m,然而小波变换需要构造基函数,一旦小波基确 定,无法以相同精度对时域和频域信息进行准确分析。 2021年山东大学杨文晨等[14]提出了基于希尔伯特黄变 换的定位方法,通过选取最高频率附近数据,在2km传 感光纤上定位误差为10m,然而其存在端点效应和模态 混叠问题,影响经验模态分解精度。上述研究为双 M-Z 干涉系统定位精度提升做出了重要贡献。

然而,常见的双 M-Z 干涉系统振动定位方法虽然实 现简单,但仍存在运算数据量大和易受循环边界影响的 缺点。当振动信号波形首尾两端的边界形状差异较大 时,互相关运算时的填充数据就会存在较大差异,严重削 弱双路振动信号之间的相似度,导致定位误差偏大。伯 格算法是振动信号功率谱估计方法,具有分辨率性能优 良、计算效率高的优点[15-16]。本文提出了一种基于伯格 算法的双 M-Z 干涉光纤振动传感系统。伯格算法是一 种直接由已知的时间信号序列计算功率谱估计值的递推 算法,其互相关结果具有稳定性。为了减少循环边界影 响,采用一种先提取特征数据后运算的方法,通过伯格算 法进行频谱分析与特征数据帧提取,并取出信号中一段 含有频率特征信息的数据段进行互相关运算,从而得到 两路信号时间延迟与实际振动位置。上述方法可以有效 减少循环边界带来的影响,从而减少了互相关计算数据 量,降低了噪声信息带来的影响,降低了振动信号的定位 误差。

1 理论分析

1.1 双 M-Z 系统振动定位原理

如图 1 所示,双 M-Z 干涉光纤振动传感系统由窄带激光光源、隔离器、多类光纤耦合器、光电探测器、传感光 纤、参考光纤组成。传感光纤长度为 L,返回光纤长度为 L_d 。当在传感光纤上的图示 Z 点处施加振动信号时,振动信号会分别在 2×2 耦合器 C2 和 2×1 耦合器 C3 处发 生干涉。若振动点与 2×2 耦合器 C2 之间距离为 x,则光 电探测器 2 可接收在 2×1 耦合器 C3 处发生的干涉信号,则振动在光纤中的传播时间 τ_1 为:



图 1 双 M-Z 干涉光纤振动传感系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of dual M-Z interferometric optical fiber vibration sensing system

$$\tau_1 = \frac{(L - x + L_d) \cdot n}{c} \tag{1}$$

而光电探测器 1 可接收在 2×2 耦合器 C2 处发生的 干涉信号,则振动在光纤中的传播时间₇,为:

$$\tau_2 = \frac{x \cdot n}{c} \tag{2}$$

因而,两路干涉信号的时间延迟为:

$$\Delta t = \tau_1 - \tau_2 = \frac{(L - 2x + L_d) \cdot n}{c}$$
(3)

从而求出振动信号 Z 点的位置为:

$$x = \frac{L + L_d - c\Delta t/n}{2} \tag{4}$$

其中,*n*为光纤的有效折射率,*c*为光速,*L*为传感光 纤长度,三者都为已知量。由式(4)可以看出,只要求得 两路干涉信号的时间延迟就可以确定振动点的位置。

1.2 基于自回归模型的伯格算法

1) 自回归模型

自回归(autoregressive, AR)模型可以看作是一个输入序列u(n)激励一个线性系统H(n)的输出 $x(n)^{[17]}$,可以用下面的差分方程表示:

$$x(n) = -\sum_{k=1}^{p} A_{p}(k) x(n-k) + u(n)$$
(5)

其中,x(n)为观测数据且 $n=0,1,\dots,N-1$,数据长度 为N,P是AR模型阶数, $A_p(k)$ 是模型参数且 $k=1,2,\dots,P,u(n)$ 是均值为0且方差为 σ^2 的输入白噪声。线 性系统H(n)的转移函数为:

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{p=1}^{p} A_{p}(k) z^{-k}}$$
(6)

$$x(n)$$
的功率谱可由下式计算:
 $P_x(e^{j\omega}) = \sigma^2 | H(e^{j\omega}) |^2$ (7)

将式(6)代入式(7)中得到:

$$P_{x}(e^{j\omega}) = \sigma^{2} \frac{1}{\left|1 + \sum_{k=1}^{p} A_{p}(k) e^{-j\omega k}\right|^{2}}$$
(8)

由式(8)可知,通过观测数据估计出的模型参数 $A_{p}(k)$,便可计算出 AR 模型的功率谱。

2)伯格算法

与同类算法相比,基于 AR 模型的功率谱估计具有 计算简单、参数估计准确等优点。其中伯格算法是对自 身数据进行递推得到所需模型参数,避免求解计算量较 大的自相关函数,计算量较小。同时能够有效分析出较 短数据中的瞬时较高频率,得到有用信息,可依据不同阶 数选取间隔频率,具有较高的频率分辨率^[18]。

设x(n)为观测数据且 $n=0,1,\dots,N-1$,数据长度为 N,前向预测误差为 $e_p^f(n)$,前向预测误差功率为 P_f ,后 向预测误差为 $e_p^b(n)$,后向预测误差功率为 P_b ,前向与 后向预测误差平均功率为 P_{av} 。其中 P_f 、 P_b 公式如下:

$$P_{f} = \frac{1}{N - P} \sum_{n=P}^{N-1} |e_{P}^{f}(n)|^{2}$$
(9)

$$P_{b} = \frac{1}{N - P} \sum_{n=P}^{N-1} |e_{P}^{b}(n)|^{2}$$
(10)

根据前向和后向预测误差功率的平均值最小准则, P_{av}公式如下:

$$P_{av} = \frac{1}{N - P} \sum_{n=P}^{N-1} \left\{ \mid e_{P}^{f}(n) \mid^{2} + \mid e_{P}^{b}(n) \mid^{2} \right\}$$
(11)

借助 Levinson-Durbin 关系式^[19], $e_p^f(n)$ 和 $e_p^b(n)$ 可得到下列递推关系:

$$e_m^f(n) = e_{m-1}^f(n) + k_m e_{m-1}^b(n-1)$$
(12)

$$e_m^b(n) = e_{m-1}^b(n-1) + k_m e_{m-1}^f(n)$$
(13)

其中,*m*=1,2,…,*P*,表示递推关系中不断变化的阶次,*k*_为反射系数。

当 *m*=*P* 且 *k*=1,2,…,*P*-1 时,利用 Levinson-Durbin 递推算法^[19]计算模型参数可得:

$$A_{P}(k) = A_{P-1}(k) + k_{P}A_{P-1}(P-k)$$
(14)

$$\overline{m} \le k = P \, \mathrm{tr}, \, \mathbb{U} \, \mathrm{Tr} \, \mathrm{d}_{\mathrm{s}} :$$

$$A_{p}(P) = k_{p} \tag{15}$$

因此,将式(14)、(15)代入式(8)即可估计出功 率谱。

1.3 特征数据帧选取

首先将原始振动数据分成 M 个长度为 N 的数据帧, 用于提取特征频率信息。第 i 个数据帧经伯格算法处理 后,可得到相应的数据帧频谱能量 E_i^i 。这里帧数(i = 1, 2,…,M) 可表征时间信息,频数(j = 1, 2, ..., Z) 可表征 数据帧频谱经离散化处理后的特定频率,不同频数可代 表不同的频率成分。因此,原始振动数据的时间-频率信 息可记为如下表达式:

$$E = \begin{bmatrix} E^{1} & E^{2} & \cdots & E^{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1}^{1} & E_{1}^{2} & \cdots & E_{1}^{2} \\ E_{2}^{1} & E_{2}^{2} & \cdots & E_{2}^{Z} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{M}^{1} & E_{M}^{2} & \cdots & E_{M}^{Z} \end{bmatrix}$$
(16)

式中: Eⁱ 表示对应于某一频数 j 的所有数据帧频谱能量 集合。分析同一频数下不同数据帧的频谱能量,计算最 大频谱能量与其他频谱能量之和的比值,得到能量比。 随后,比较不同频数下的能量比,选取能量比最大时的频 数作为最优频数。同时,在最优频数下比较不同模型阶 数(P)时的能量比,选择能量比最大的模型阶数作为最 优阶数。

最后,确定在最优频数和最优阶数条件下,伯格频谱 图中最高峰所对应的帧数。此帧数所对应的数据帧即为 后续互相关时延估计所处理的特征数据帧。

1.4 振动定位算法流程

为了减少互相关运算数据量进一步降低定位误差, 本文提出了一种基于伯格算法的双马赫-曾德干涉光纤 振动传感系统,通过选取特征数据帧实现精确定位。获 取振动位置的算法流程如下:

1)首先将原始振动数据进行双通道分离成 A、B 两 路信号,之后进行预处理去除噪声、直流等干扰信息。

2) 对预处理后的数据进行等数据量分帧后利用伯格 算法进行频谱分析, 得到信号的频谱能量 Eⁱ_i, 进而叠加 得到伯格频谱三维图。

3)通过特征数据帧选取方法,得到最优频数、最优阶 数下伯格频谱最高峰所对应的数据帧数。

4)取出步骤 3)中帧数对应下的数据段与另一路相 匹配,匹配则保留进行下一步互相关时延估计,不匹配则 重复步骤 3)中操作,直至选出匹配数据段。

2 实验结果分析

2.1 直接互相关时延估计结果分析

根据图 1 所示的实验系统,搭建如图 2 所示的实验 装置,传感光源选用波长为 1 550 nm 的窄带激光光源,隔 离器负责使光源单方向通过,经过耦合器 C1 被分为两路 光信号,分别沿顺、逆时针方向传播在耦合器 C3、耦合器 C2 处发生干涉后被光电探测器 2、光电探测器 1 采集。 光电探测器转化后的电信号经数据采集卡采集后传至上 位机,进行振动定位算法的处理。实验中采用长度为 2 000 m 双芯铠装光纤和 200 m 三芯铠装光纤共同构成 长度均为 2 200 m 的传感光纤、参考光纤,长度为 200 m 的返回光纤。其中,铠装光纤抗噪声能力较强,不易受到 外界环境影响且利于实际应用。



图 2 双 M-Z 干涉光纤振动传感系统实验装置图 Fig. 2 Experimental device diagram of dual M-Z interferometric optical fiber vibration sensing system

在耦合器 C2 与耦合器 C4 之间的传感光纤上,采用 金属片敲击的方式模拟真实扰动事件,具体位置为2km。 利用采集卡进行数据采集,采样率为12.5 MHz/s,采样时 间为0.1 s,总采样点个数为1 250 000,采集到的A、B两 路振动信号时域图如图3所示。





如图 3 所示,由于 A 路信号与 B 路信号对应于同一振动事件,两路信号在波形和幅值上具有相似性,但会由

于信号传输时间的差异而存在一定的时延。因此,可将 A、B两路振动信号进行预处理去除直流、噪声后进行传 统的直接互相关时延估计运算来获取信号之间的时间延 迟信息。

如图 4 所示,由最高峰值的局部放大图可知互相关 峰对应的时间延迟(Δt)为-7.36 μs,即光电探测器 2 采 集到的振动信号超前于光电探测器 1 采集到的振动信 号。因而,由式(4)得到采用直接互相关时延估计算法 的最终定位结果(x)约为 1 951 m。



2.2 基于伯格算法的数据帧频谱分析

实验中,原始振动数据为1250000个采样点,其采 样时间为0.1s。若直接对时长为0.1s的原始数据进行 直接互相关时延估计需要分析1250000个数据采样点, 通过软件处理所用时间为0.2s。若通过特征数据帧选 取方法,将原始振动数据分成125个长度相等为10000 个数据采样点的数据帧,选取特征数据帧后进行互相关 时延估计则只需分析10000个数据采样点,在同样的硬 件条件下进行软件处理所用时间为0.004s,速度提升了 50倍并减少了互相关计算数据量,从而降低了噪声信息 带来的影响。

随后,利用伯格算法对图 3 中的 A 路信号进行数据 帧频谱分析。先对原始振动数据进行预处理去除直流与 噪声信号,再以每 10 000 个数据采样点为一帧的规律, 将预处理完的数据分成等长的 125 个数据帧。数据帧长 度过短会影响频率分辨率,而数据帧长度过长则会影响 计算效率。将等分后的数据帧分别利用伯格算法进行频 谱分析,得到数据帧的频谱能量。

如图 5(a) 所示,图中选择的频数(j) 范围为 2~10, 对应的频谱范围为 2.44 kHz~22 kHz,频数 1 对应的直流 分量未在图中画出。同一频数下,不同的数据帧表现出 不同的能量值,随着频数与频率的增大,数据帧尖峰数量 减少,即包含该频率成分的数据帧在减少。作为对比,相 同条件下利用 FFT 算法作出频谱三维图。如图 5(b) 所 示,随着频数的增大,数据帧尖峰数量多于伯格频谱,且 最高能量值低于伯格频谱,即包含该频率成分的数据帧 仍然较多。





如图 6 所示,通过特征数据帧选取方法计算伯格算法和 FFT 算法在不同频数下的能量比,由文献[13-14]可知振动事件中的高频成分有利于降低定位误差,此处选择的频数(*j*)范围为 1~50,对应的频谱范围为 0 Hz~120 kHz。

如图 6(a) 所示,伯格算法在不同频数下的能量比波 动范围较大,且可通过选取能量比最大值来提取出特征 频数信息。为此在图中可选取能量比约为 1.1 时的频数 19 为最优频数。而在图 6(b)中,FFT 算法在不同频数下 的能量比仅在 0.025~0.055 之间小范围波动,且无法观 测到能量比突出的频数信息。因此,伯格算法相比于 FFT 算法在特征数据帧选取上更有优势。

对于伯格算法来说,阶数 P 的选择非常重要,P 值过 大或过小均会造成谱线分裂、谱峰偏移现象,对分辨率产 生明显影响。因此,选取图 6(a)中最优频数 19 对应的 频谱图,通过对比不同阶数下频谱图中的信噪比来选取 最优阶数来减少谱线分裂、谱峰偏移现象。在不同阶数 下,最优频数 19 对应的频谱能量 E¹⁹ 伯格频谱三维图及 其能量比如图 7 所示,其中阶数 P=N/W,N=10 000,为 一帧数据长度,W 为比例系数,图(a)中 W=2,3,4,5,6, 图(c)中 W=2.5,2.6,…,3.5,间隔 0.1。

图 7(a) 是频谱能量 E¹⁹ 在阶数 P=N/2-N/6 时的伯格频谱图,频谱能量 E¹⁹ 在 N/2-N/6 阶数下的能量比如图 7(b)所示,可以观察到当比例系数 W=3,即阶数 P=



图 6 不同频数下两种算法的能量比

Fig. 6 Energy ratio of two algorithms at different frequency number

N/3 时频谱信号能量比最高。为进一步确定最优阶数, 阶数为 *N*/2.5-*N*/3.5 时对应的伯格频谱三维图如图 7 (c)所示。频谱能量 *E*¹⁹ 在 *N*/2.5-*N*/3.5 阶数下的能量 比如图 7(d)所示,可以观察到当比例系数 *W*=2.6,即阶 数 *P*=*N*/2.6 时频谱信号能量比最高,进而确定频谱能量 *E*¹⁹ 的最优阶数为 *N*/2.6。

2.3 基于伯格算法的时延估计结果分析

在最优频数为 19 和最优阶数为 N/2.6 的条件下,提 取伯格频谱图后确定其特征数据帧,进行预处理去除直 流、噪声后通过互相关算法计算数据帧对应的时间延迟 并得出振动位置。伯格算法取帧后的互相关结果如图 8 所示。

如图 8(a) 所示,通过能量比大小确定特征数据帧位 于第 32 帧,其对应帧的数据如图 8(b) 所示,可以看出所 提取的帧数据具有相关性且时间上具有明显的先后性。 特征数据帧互相关结果如图 8(c) 所示,通过最高峰值的 局部放大图得出对应的时间延迟(Δt) 为-7.92 μ s,则由 式(4)得到最终定位结果(x) 为 2 008.2 m。

随后,在不同位置处施加不同的敲击信号来验证方 法在不同位置处、同种扰动激励下振动定位的可靠性。 分别在0m、1km处通过敲击施加扰动信号,定位结果分 别如图9、10所示。

图 9(a)为在 0 m 处施加敲击信号后的直接互相关时延估计结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应的时间延迟(Δt)为 5.52 μ s,由式(4)得到最终定位结果(x)为 636.7 m,直接运算误差较大。图 9(b)为通过提取特征数据帧后的互相关结果,通过最高峰值的局部放大





图得出对应的时间延迟(Δt)为11.68 μs,则由式(4)得 到最终定位结果(x)为8.2 m。

图 10(a)为在 1 km 处施加敲击信号后的直接互相 关时延估计结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应 的时间延迟(Δt)为 1.44 μs,由式(4)得到最终定位结果 (x)为 1 053.1 m。图 10(b)为在 1 km 处施加敲击信号





后通过提取特征数据帧后的互相关结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应的时间延迟(Δt)为2 μ s,则由式(4)得到最终定位结果(x)为995.9m。

接下来,在同一位置处施加不同的扰动信号来进一步验证方法用于振动定位的可靠性。在1km处分别通过踩踏、周期性激励施加扰动信号。其定位结果分别如图11、12所示。

图 11(a)为在 1 km 处施加踩踏信号后的直接互相 关时延估计结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应 的时间延迟(Δt)为 2.64 μ s,由式(4)得到最终定位结果 (x)为 930.6 m。图 11(b)为通过提取特征数据帧后的互 相关结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应的时间 延迟(Δt)为 1.92 μ s,则由式(4)得到最终定位结果(x) 为 1 004.1 m。

图 12(a) 为在 1 km 处通过 PZT 施加频率大小为 10 kHz 的周期性正弦信号后的直接互相关时延估计结





果,通过最高峰值的局部放大图得出对应的时间延迟 (Δt)为 2.4 μs,由式(4)得到最终定位结果(x)为 955.1 m。图 12(b)为通过提取特征数据帧后的互相关 结果,通过最高峰值的局部放大图得出对应的时间延迟 (Δt)为 2 μs,则由式(4)得到最终定位结果(x)为 995.9 m。





因此,采用伯格算法进行频谱分析后提取的特征数 据帧,其定位误差相较传统的直接互相关算法有着明显 的降低。

接下来分别在0m、1km、2km处分别施加敲击、踩踏、周期性激励信号,分析不同频数下的能量比特征作为 最优频数选取方法,如表1所示。

Table 1	Characteristics of energy ratio unde
	different positions and signals

		-	-	
实验	接动位型	信旦米刑	频数能量比	能量比最大值
次数	机列位直	信号英型	最大值	与次大值比值
1	0 m	敲击	1.17	2.30
2	0 m	踩踏	1.97	2.32
3	0 m	周期性激励	1.29	6. 79
4	1 km	敲击	2.21	2.35
5	1 km	踩踏	1.46	2.28
6	1 km	周期性激励	1.17	2.66
7	2 km	敲击	1.22	2.59
8	2 km	踩踏	2.21	2.11
9	2 km	周期性激励	3.01	2.32

表1中频数能量比最大值反映的是某一频数下不同 数据帧中最大频谱能量与其他频谱能量之和的比值最 大,比值越大则该频数对应的频率成分越突出。能量比 最大值与次大值比值反映的是不同频数下频率成分的突 出程度,比值越大则该频数对应的频率成分越突出。因 此可通过改变频数选择最大能量比及能量比值尽可能大 的频数作为最优频数。经过9次不同位置和信号下的测 试结果,选择最大能量比值大于1且能量比最大值与次 大值比值大于2的频数作为最优频数。确定最优频数后 通过比较不同阶次下能量比大小选择该频数能量比最大 值对应的阶次作为最优阶次,使得频数对应的频率成分 最明显。最后提取特征数据帧互相关得出定位结果。通 过确定上述比较条件,为将来算法自适应执行提供参考。

随后,在不同位置处施加不同的扰动信号,通过重复 性实验来验证方法的可靠性。表2为直接互相关算法与 伯格算法的平均定位误差结果对比。

表 2	两种算法定位结果	

Table 2 Positioning results of two algorithm
--

实验次数	扰动位置	信号类型	直接互相关算法/m	伯格算法/m
10	0 m	敲击	236. 7	10.8
20	0 m	踩踏	122. 4	9.6
30	0 m	周期性激励	24.5	4.1
40	1 km	敲击	70.1	8.2
50	1 km	踩踏	43.6	6.8
60	1 km	周期性激励	35.8	5.6
70	2 km	敲击	60.4	8.2
80	2 km	踩踏	52.1	8.2
90	2 km	周期性激励	23.6	4.1

经过 90 次实验结果对比,在 2.2 km 的传感光纤长 度和 12.5 MHz/s 的采样率下,直接互相关算法的平均绝 对误差为 74.4 m,伯格算法的平均绝对误差为 7.3 m。 因此,相较于直接互相关算法,经过伯格算法取帧后的数 据在定位误差上有明显的降低,同时减少了互相关运 算量。

3 结 论

本文提出了一种基于伯格算法的双马赫-曾德干涉 光纤振动传感系统。利用频谱分析法研究了伯格算法在 不同频数下的能量特征,通过能量比对比确定最优频数, 并进行了最优阶数的选值分析,从而提取出特征数据帧, 最后利用互相关运算得出实际的振动位置。重复性实验 结果表明,本方法能在 2.2 km 的传感光纤上实现平均绝 对误差仅为 7.3 m 的振动信号定位,因而在光纤周界安 防定位监测方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 付会军.基于光纤光栅传感的数字化文物智能保护系统[J].微型电脑应用,2022,38(5):145-148.
 FU H J. Digital cultural relics intelligent protection system based on fiber grating sensor[J]. Microcomputer Application, 2022, 38(5):145-148.
 [2] 梁晨,倪克琦,常素良,等.轨道交通监测用光纤光栅
 - J 架展, 仍见词, 常家良, 等. 轨道交通监测用几年几侧 解调设备设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (8): 154-158.
 LIANG CH, NI K Q, CHANG S L, et al. Research of optical fiber grating demodulation equipment used in rail transit monitoring [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(8):154-158.
- [3] 尹露.光纤传感技术下的快速路交通状态监测研究[J]. 交通工程,2020,20(6):24-29,36.
 YIN L. Research on expressway traffic condition monitoring based on optical fiber sensing technology[J]. Journal of Transportation Engineering, 2020,20(6):24-29,36.
- [4] 吴红艳,贾波,卞庞.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. Research on endpoint

detection technology of optical fiber perimeter security system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4):743-748.

[5] 李帅永,毛维培,程振华,等.基于广义互相关的供水 管道泄漏振动信号时延估计器性能研究[J].电子测 量与仪器学报,2021,35(2):202-211.

LI SH Y, MAO W P, CHENG ZH H, et al. Performance of time delay estimator for leakage vibration signal of water supply pipeline based on generalized cross correlation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2):202-211.

[6] 赵越,赵英亮,王黎明,等. 基于 EEMD 的压力管道泄 漏声源定位[J]. 国外电子测量技术,2021,40(7): 128-132.

ZHAO Y, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Acoustic

source location of pressure pipeline leakage based on EEMD[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(7):128-132.

- [7] KIZLIK B. Fibre optic distributed sensor in machzehnder interferometer configuration [C]. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, International Conference, IEEE, 2002;128-130.
- [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. Positioning technology of dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2128-2132.

[9] 潘岳,王健.双马赫-曾德尔型干涉仪定位技术研究[J]. 光学仪器,2012,34(3):54-59. PAN Y, WANG J. Research on positioning technology of

dual Mach-Zehnder interferometric [J]. Optical Instrument, 2012, 34(3):54-59.

- [10] CHEN Q N, LIU T G, LIU K, et al. An improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometric disturbance sensing system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (10): 1954-1960.
- [11] 杨顺智,张志勇,邵理阳,等.基于二次相关算法的双M-Z光纤传感器的定位方法[J].光子学报,2017,46(7):69-74.

YANG SH ZH, ZHANG ZH Y, SHAO L Y, et al. Positioning method of dual M-Z optical fiber sensor based on quadratic correlation algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7):69-74.

- [12] 申欢,白元涛,刘继红.双 M-Z 型光纤振动传感器分级 互相关定位方法[J].光通信技术,2019,43(6):1-4.
 SHEN H, BAI Y T, LIU J H. Hierarchical cross correlation positioning method for dual M-Z optical fiber vibration sensors [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(6):1-4.
- 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.
- [14] 杨文晨,秦增光,刘兆军,等.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.

YANG W CH, QIN Z G, LIU ZH J, et al. Vibration location method of dual mach-zender distributed fiber sensing based on Hilbert-Huang transform [J]. Chinese Optics, 2021, 14(6):1410-1416.

- [15] 张峰,王东,石现峰.振动信号 Burg 谱估计算法的性能 优化研究[J]. 计算机仿真,2017,34(4):262-266.
 ZHANG F, WANG D, SHI X F. Performance optimization of burg spectrum estimation algorithm for vibration signals [J]. Computer Simulation, 2017, 34(4):262-266.
- [16] 安然,刘小军. 基于 AR 模型的水流速雷达信号处理方法[J]. 电子测量技术,2020,43(9):51-55.
 AN R, LIU X J. Radar signal processing method of water velocity based on AR model[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(9):51-55.
- [17] 单东升,张培强,李超.基于 AR 模型的功率谱估计[C]. 第六届全国信号和智能信息处理与应用学术会议, 2012:518-521.

SHAN D SH, ZHANG P Q, LI CH. The power spectrum estimation based on AR model[C]. The Sixth Signal and Intelligent Information Processing and Application Conference, 2012:518-521.

 [18] 钱莹晶,周群. Burg频谱估计算法的硬件加速方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(9): 1382-1390.

> QIAN Y J, ZHOU Q. Research on hardware acceleration method of burg spectrum estimation algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9):1382-1390.

[19] 邓泽怀,刘波波,李彦良.常见的功率谱估计方法及其 MATLAB 仿真[J].电子科技,2014,27(2):50-52.
DENG Z H, LIU B B, LI Y L. Common power spectrum estimation methods and MATLAB simulation [J].
Electronic Technology, 2014, 27(2):50-52.

作者简介



王华阳,2019年于江汉大学获得学士 学位,现为太原理工大学硕士研究生,主要 研究方向为光纤传感器。

E-mail: 1210683302@ qq. com

Wang Huayang received his B. Sc.

degree in 2019 from Jianghan University. Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



王宇(通信作者),2014年于法国塞吉-蓬图瓦兹大学获得博士学位,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 (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2014 from

Cergy-Pontoise University. Now he is an associate professor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.