【光电工程／Optoelectronic Engineering】

基于敲击振动的长距离分布式定位方法

卢骏宏[1,2]，刘国强[1,2]，杜林锹[1,2]，戴尚玮[1,2]，朱润龙[1,2]，陆丹霞[1,2]，饶兴[1,2]，刘涵洁[1,2]，陈宇徽[1,2]，王义平[1,2]

1）深圳大学射频异质异构集成全国重点实验室，光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室，物理与光电工程学院，广东深圳 518060；2）深圳大学深圳市超快激光微纳制造重点实验室，光纤传感技术粤港联合研究中心，广东深圳 518060

摘　要：为有效映射地下空间振动，尤其是沿管道形成的非周期敲击振动，提出一种基于马赫-曾德干涉仪和前向传输分布式振动传感技术相结合的非周期振动定位方法．利用光纤对光的相位调制来解调非周期振动信号．实验对比了互相关、时间偏移标准偏差及相位谱时延方法的定位精度．结果表明，互相关和时间偏移标准偏差方法在定位非周期信号时能提供更高的定位精度，而相位谱时延方法由于其主频成分一致性较差，导致定位精度较低．最终在总长度为60.32 km的传感光纤上，实验验证了非周期振动信号的定位精度可以达到10 m．本研究定位方法对于长距离或复杂环境中的振动监测，如地下管道的故障检测，具有良好的应用前景．

关键词：光电子与激光技术；分布式传感器；光纤；前向传输；分布式振动传感系统；同向正交解调；相位谱；互相关法；时间偏移标准偏差；振动定位

中图分类号：O439；TP212.1　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3724/SP.J.1249.2026.02187

Long-range distributed localization method of tapping-based vibrations

LU Junhong[1,2], LIU Guoqiang[1,2], DU Linqiao[1,2], DAI Shangwei[1,2], ZHU Runlong[1,2], LU Danxia[1,2], RAO Xing[1,2], LIU Hanjie[1,2], CHEN George Yuhui[1,2], and WANG Yiping[1,2]

1) State Key Laboratory of Radio Frequency Heterogeneous Integration, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Shenzhen Key Laboratory of Ultrafast Laser Micro/Nano Manufacturing, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To enable effective mapping of underground vibrations, particularly non-periodic impact signals propagating along pipelines, this paper proposes a non-periodic vibration localization method that integrates a Mach-Zehnder interferometer (MZI) with forward transmission distributed vibration sensing (FTDVS) technology. Non-periodic vibration signals are demodulated through optical phase modulation in the sensing fiber. Comparative

Received: 2025-02-19; **Revised:** 2025-08-29; **Accepted:** 2025-09-09; **Online** (CNKI)**:** 2025-12-03

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2022YFE0111400); National Natural Science Foundation of China (W2532046, 62275172, U22A2088); Shenzhen Basic Research Foundation (JCYJ20241202124408012, JCYJ20220818095800001); Shenzhen Science and Technology Program (Shenzhen Key Laboratory of Ultrafast Laser Micro/Nano Manufacturing ZDSYS20220606100405013); Scientific Instrument Developing Program of Shenzhen University (2023YQ027); LingChuang Research Project of China National Nuclear Corporation

Corresponding author: Professor CHEN George Yuhui (gychen@szu.edu.cn)

Citation: LU Junhong, LIU Guoqiang, DU Linqiao, et al. Long-range distributed localization method of tapping-based vibrations [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(2): 187-195. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

http://journal.szu.edu.cn

experiments were conducted to evaluate the localization accuracy of the three algorithms: cross-correlation, time shifted standard deviation (TSDEV), and phase spectrum time-delay methods. Results show that both the cross-correlation and TSDEV algorithms provide higher localization accuracy for non-periodic signals, whereas the phase spectrum time-delay method exhibits reduced accuracy due to insufficient consistency in dominant frequency components. Experimental validation over a 60.32 km sensing fiber demonstrates that a localization accuracy of approximately 10 m can be achieved for non-periodic impact vibrations. Therefore, the proposed localization approach exhibits strong potential for long-distance vibration monitoring and fault detection in complex underground environments, particularly in pipeline systems.

Key words: optoelectronics and laser technology; distributed sensor; optical fiber; forward transmission; distributed vibration sensing system; in-phase and quadrature demodulation; phase spectrum; cross-correlation method; time shift standard deviation; vibration localization

管道作为城市基础设施的重要组成部分，不仅承担着能源输送和资源供给的重任，还直接关系到城市居民的生活质量和经济活动的正常运行. 根据《2023年中国城市建设状况公报》[1]显示，截至2023年末，中国城市供水管道长度为1 153 100 km，天然气管道长度为1 039 200 km，集中供热管道长度为523 700 km. 而在2022年10月至2023年9月，全国地下管线破坏事件共1 137起[2]，其中，因管道破坏造成的事故共936起，占事故总数的82.32%. 事故频发给城市运营带来巨大隐患，也凸显了加强管道监测的重要性. 为保障管道的长期运行和安全稳定，需定期对其进行全面、有效地监测.

地下管道由于埋设位置隐蔽，易受到土壤覆盖、道路交通及建筑施工等外界环境干扰，为其日常监测和故障排查带来诸多难题. 特别是当管道受到外部敲击或振动时，声波或振动信号的传播会受到地层密度、结构及周围噪声的影响，导致难以精确定位故障点位置. 目前已有多种技术手段用于地下管道的监测[3]，其中，传统人工巡检方式虽然简单，但效率低且覆盖面有限；基于电磁波和超声波的探测方法可以通过反射信号检测管道异常情况[4-5]，但在导电性较高的地质介质中，电磁波强度衰减快，难以探测较深的管道，且重复测量成本较高，不适合长期、实时监测.

分布式光纤传感器[6-8]作为一种具有高灵敏度特性的新兴手段，能够实时监测管道沿线的应变和振动变化. 分布式光纤振动传感系统的实现主要包括后向散射型与前向传输型两种方式. 对于后向散射系统[9-10]，需通过后向散射信号的相位变化反推振动信息，但受限于双程衰减，长距离测量时信号信噪比会显著下降. 在现有前向传输分布式振动传感[11](forward transmission distributed vibration sensing，FTDVS)结构中，Sagnac干涉环[12]具有零光程差的优点，但只能获得单个相位差信号，无法满足互相关等时延估计算法对双相位信息的需求；而自相干结构[13]虽然对激光器线宽要求较低，但由于光信号需要往返传输，仍然会引入额外衰减，限制了其在长距离应用中的性能.

相比之下，基于马赫-曾德干涉[14](Mach-Zehnder interferometer，MZI)的前向传输分布式传感不仅能够在接收端同时获取两个独立相位信号，为互相关等时延算法提供可靠输入，还保留了前向传输体系的高信噪比优势，在长距离管道监测中具有明显优势. 前向传输方式凭借其与通信系统信号路径的共用性、具有损耗低、易于与相干检测结合及兼容现有设备等诸多优势，使其在光纤通信系统的集成应用中具有显著优势.

马赫-曾德干涉前向传输分布式振动传感(Mach-Zehnder interferometer - forward transmission distributed vibration sensing，MZI-FTDVS)通过锆钛酸铅(lead zirconate titanate，Pb-Zr-Ti，PZT)压电陶瓷施加持续固定频率的振动信号以实现振动源定位. 然而，在实际应用场景中，管道受到单次敲击时，振动源往往呈现瞬态特性[15]，无法形成连续信号. 这种信号形式的短时性和随机性给现有基于固定频率信号的延时求解方法带来挑战. 因此，针对瞬态信号特性，进一步提高MZI-FTDVS在复杂环境下应用的可靠性和精确性，对于提升管道安全管理水平至关重要.

本研究采用3种方法实现周期振动信号的有效定位，突破传统方法对连续周期信号的依赖，解决了非周期型敲击振动信号难以精确定位的问题. 其中，利用互相关法和时间偏移标准偏差法(time shift standard deviation，TSDEV)，成功实现在60 km

http://journal.szu.edu.cn

范围内对单次敲击振动源的高精度定位，为复杂环境下的长距离分布式振动监测提供切实可行的解决方案.

1　MZI-FTDVS结构

当MZI结构中两束相干光在空间中合并时，其相位差决定了干涉光的强度分布[16]. 激光器发出角频率为ω的线偏振光，其复电场$\boldsymbol{E}(t)$为

$$\boldsymbol{E}(t)=\boldsymbol{p}E\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{1}$$

其中，E表示复振幅；$\boldsymbol{p}$为偏振方向单位矢量.

干涉光强度I为

$$I=\left|\boldsymbol{E}(t)\right|^2=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\right|^2=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)\right|^2+\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\right|^2+\mathrm{Re}\left(\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}^{*}(t)\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}^{*}(t)\right) \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)$分别为本振光和信号光的电场；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}^{*}(t)$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}^{*}(t)$分别为$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)$的复共轭.

$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)$分别可表示为

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)=\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}}E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)=\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)} \tag{4}$$

其中，E_{LO}和E_{S}分别为本振光和信号光的电场振幅；$\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}}$与$\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}$分别为本振光和信号光偏振方向的单位矢量；$\Phi$为本振光和信号光的相位差. 由于本研究光纤系统中信号光与本振光偏振保持一致，二者具有相同的偏振单位向量，即

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}=\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}\cdot\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}}=1 \tag{6}$$

则式（2）中的干涉项可进一步表示为

$$\mathrm{Re}\left(\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}^{*}(t)\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}^{*}(t)\right)=\mathrm{Re}\left(\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}\cdot\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}}E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}+\boldsymbol{p}_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}\cdot\boldsymbol{p}_{\mathrm{LO}}E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t}\right)=2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\cos\Phi \tag{7}$$

因此，在后续推导中实际参与运算的是复振幅E和相位，不再讨论光场的偏振方向.

相位差Φ可通过90°光混频仪测得. 90°光混频仪的输入包括激光器输出的本振光电场$\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)$和经过振动的信号光电场$\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)$. 90°光混频仪输出包含两路同相分量与两路正交分量，分别是信号光和本振光以特定相位关系（0°、180°、90°及270°）组合干涉的结果. 两路同向光强度分量I_{P1}和I_{P2}别为

$$I_{\mathrm{P1}}(t)=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\right|^2=\left|E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}+E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\right|^2=E_{\mathrm{S}}{}^2+E_{\mathrm{LO}}{}^2+2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\cos\Phi \tag{8}$$

$$I_{\mathrm{P2}}(t)=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{i}\pi}\right|^2=\left|E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}-E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\right|^2=E_{\mathrm{S}}{}^2+E_{\mathrm{LO}}{}^2-2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\cos\Phi \tag{9}$$

两路正交分量I_{H1}和I_{H2}分别为

$$I_{\mathrm{H1}}(t)=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{i}\frac{\pi}{2}}\right|^2=\left|E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}+\mathrm{i}E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\right|^2=E_{\mathrm{S}}{}^2+E_{\mathrm{LO}}{}^2+2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\sin\Phi \tag{10}$$

$$I_{\mathrm{H2}}(t)=\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{S}}(t)+\boldsymbol{E}_{\mathrm{LO}}(t)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{i}\frac{3\pi}{2}}\right|^2=\left|E_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t+\Phi)}-\mathrm{i}E_{\mathrm{LO}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\right|^2=E_{\mathrm{S}}{}^2+E_{\mathrm{LO}}{}^2-2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\sin\Phi \tag{11}$$

各自相减去除直流分量后，最终输出的同相分量和正交I_{P}和I_{H}为

$$I_{\mathrm{P}}=I_{\mathrm{P1}}(t)-I_{\mathrm{P2}}(t)=4E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\cos\Phi \tag{12}$$

$$I_{\mathrm{H}}=I_{\mathrm{H1}}(t)-I_{\mathrm{H2}}(t)=4E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\sin\Phi \tag{13}$$

因此，

$$\Phi=\arctan\frac{I_{\mathrm{H}}}{I_{\mathrm{P}}} \tag{14}$$

2　振动定位方法

本研究采用双端结构获取振动信息，进而确定振动的具体位置. MZI分为对称型和非对称型[17]两种结构，其中，对称型MZI的结构如图1，激光器出射光通过耦合器分束后，分别以顺时针和逆时针方向传输进入光电探测器. 设振动发生在长度为L传感光纤的x处，由顺时针和逆时针方向进入耦合器的时间分别为t_1和t_2，通过计算时间差Δt可以推导出振动点位置x，通过频域法或时域法[18]确定Δt，即

$$t_1=\frac{xn}{c} \tag{15}$$

$$t_2=\frac{(L-x)n}{c} \tag{16}$$

$$\Delta t=t_2-t_1 \tag{17}$$

$$x=\frac{1}{2}\left(L-\frac{c\Delta t}{n}\right) \tag{18}$$

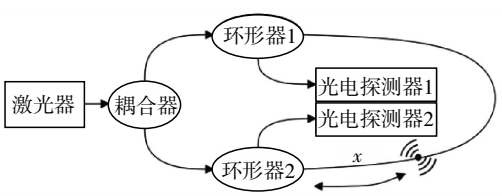


图 1　对称型光纤Mach-Zehnder干涉仪结构

Fig. 1　Structure of symmetric fiber Mach-Zehnder interferometer.

http://journal.szu.edu.cn

其中，c为真空中的光速；n为光纤的折射率.

2.1 频域法(相位谱时延法)

频域法通过对解调后的信号做快速傅里叶变换(fast Fourier transform，FFT)，提取顺时针和逆时针的主频率及其相位谱来计算Δt. 沿顺、逆时针方向传播的光信号，经过解调后的相位信号$\Phi_1(t)$和$\Phi_2(t)$分别为

$$\Phi_1(t) = A_1\cos\left(2\pi f_0(t - t_1) + \Phi_0\right) \tag{19}$$

$$\Phi_2(t) = A_2\cos\left(2\pi f_0(t - t_2) + \Phi_0\right) \tag{20}$$

其中，A_1和A_2分别为两路相位信号的幅度大小；f_0为信号频率；t_1和t_2分别为振动信号沿顺、逆时针方向到达解调端的时间；Φ_0为振动信号的初始相位.

对$\Phi_1(t)$和$\Phi_2(t)$做傅里叶变换之后得到$F_1(f)$和$F_2(f)$为

$$F_1(f) = A_1(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_1(f)} = A_1(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\Phi_0 - 2\pi f t_1)} \tag{21}$$

$$F_2(f) = A_2(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_2(f)} = A_2(f)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\Phi_0 - 2\pi f t_2)} \tag{22}$$

其中，$A_1(f)$和$A_2(f)$分别为$\Phi_1(t)$和$\Phi_2(t)$的幅度谱；$\varphi_1(f)$和$\varphi_2(f)$分别为$\Phi_1(t)$和$\Phi_2(t)$的相位谱，在信号频率f_0处的相位差$\Delta\varphi$为

$$\Delta\varphi = \varphi_1(f_0) - \varphi_2(f_0) = \left(\Phi_0 - 2\pi f_0 t_1\right) - \left(\Phi_0 - 2\pi f_0 t_2\right) = 2\pi f_0\Delta t \tag{23}$$

因此，在信号频率f_0处提取的时间差为

$$\Delta t = \frac{\varphi_1(f_0) - \varphi_2(f_0)}{2\pi f_0} \tag{24}$$

2.2 时域法

常见的时域法包括互相关法和TSDEV法[19]. 互相关法通过计算两个信号在不同时间偏移下的相似性，找到它们最相似(最匹配)的位置，这一位置的时间偏移量(对应最大互相关值的索引)即为两个信号的时间延迟. 互相关函数$R_{x_1x_2}(\tau)$为

$$R_{x_1x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)x_2(t + \tau)\mathrm{d}t \tag{25}$$

其中，$x_1(t)$为参考信号；$x_2(t)$为待测信号；τ为时间延迟.

当$\tau = \Delta t$时，时间延迟被完全补偿，因此，通过寻找互相关函数的最大值及其索引，将得到的索引换算成时间延迟即可得到振动位置.

TSDEV法通过两个信号差值的标准偏差估计时间延迟[20]，标准偏差函数V为

$$V = \mathrm{TSDEV}(\tau) = \sigma\left[x_1(t) - x_2(t + \tau)\right] = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_w}^{t_w + T}\left\{x_1(t) - x_2(t + \tau) - E\left[x_1(t) - x_2(t + \tau)\right]\right\}^2\mathrm{d}t} \tag{26}$$

其中，$\sigma[\cdot]$为取标准差；t_w为时间窗口初始大小；T为遍历的时间窗口大小. V值越小表明两个信号之间的相似度越高，通过找到V最小值对应的时间偏移即为实际的时间延迟.

3 实验装置

图2为敲击振动传感系统的实验装置. 激光器为NKT Photonics公司的E15型窄线宽激光器(线宽为100 Hz)，其输出波长为1 550.12 nm，输出光功率为6 mW，经1×3耦合器分成S_1、S_2及LO三个通道，其中，LO通道的光经过50∶50耦合器后作为光混频仪的参考光输入；S_1通道的信号光在沿路径1经过长度为60 km的传感光纤后，通过环形器2输

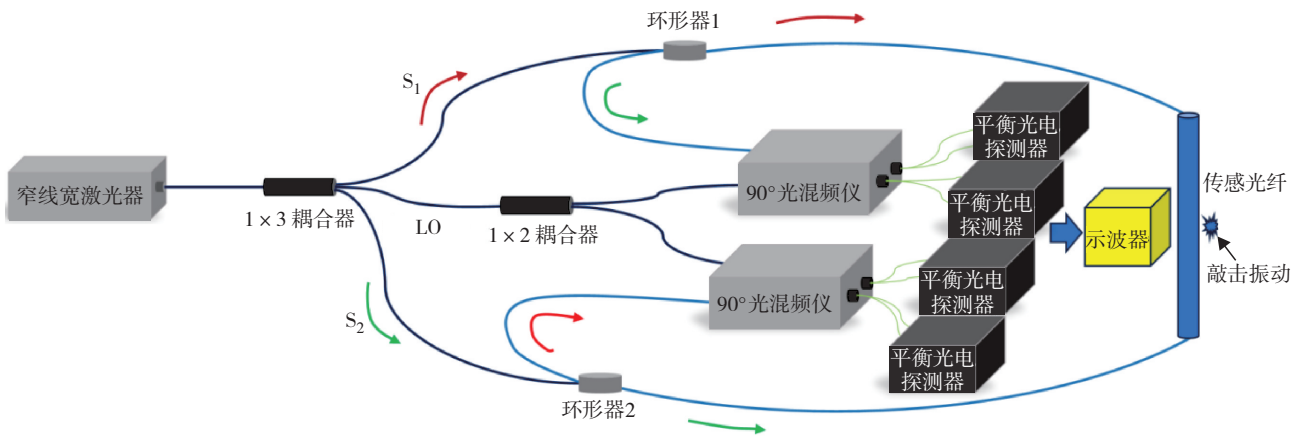


图2 敲击振动传感系统实验装置

Fig. 2 (Color online) Experimental setup of distributed vibration sensing system.

http://journal.szu.edu.cn

入混频仪；S_2通道的信号光在经过相同的传感光纤后，沿路径2由环形器1输入到混频仪，两个混频仪各自输出4个光信号，分别使用两个带宽为400 MHz 的 Thorlabs PDB470C-AC 型平衡光电探测器（Balanced Photodetector，BPD）将光强信号转换为电压信号并去除直流分量，并通过示波器以 9.62 MHz采样率、1 s采样时间进行采集.

在信号处理阶段，4个BPD输出的电压信号被分别标记，经过反正切和相位展开操作后解调出两个路径的相位信号 $\Phi_1(t)$和 $\Phi_2(t)$，将其通过1个阶数为8、截止频率为 50 Hz 的无限冲激响应（infinite impulse response， IIR）高通滤波器去除信号中的低频分量，分别采用第2节的3种定位方法求解延时，最终求出振动的具体位置.

4　实验结果与分析

4.1　周期振动信号测试

使用1 kHz正弦信号驱动的PZT作为周期振动源，以S_1方向的环形器1输出作为顺时针传感光路的起始点，将振动信号分别施加在 20.09 km 和 40.23 km 处（传感光纤总长度为 60.32 km），通过光时域反射仪（optical time-domain reflectometer，OTDR）测量确定具体位置. 经正交解调得到的顺时针和逆时针相位信号见图3. 可见，顺逆时针方向的解调信号周期约为 1 ms，对应 PZT 上施加的 1 kHz的信号源频率. 图3中两信号存在一定时间延迟，通过计算该延迟可以确定振动位置.

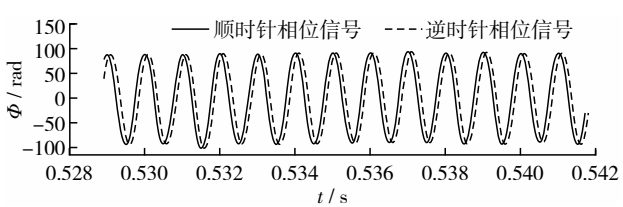


图3　解调后相位信号时域图（20.09 km处）

Fig. 3　Time-domain trace of the demodulated clockwise (solid line) and counterclockwise (dashed line) phase signals at 20.09 km.

分别采用第2节中的3种定位方法对在 20.09 km和40.23 km处产生振动相位信号作互相关处理，定位结果如图4. 其中，黑色斜线表示理论计算的时间差与振动位置之间的关系曲线，用于验证不同方法计算结果的合理性. 3种方法的计算结果通过不同标识进行区分，计算结果与理论曲线的趋势基本一致. 整体来看，3种方法均能实现周期振动信号的定位.

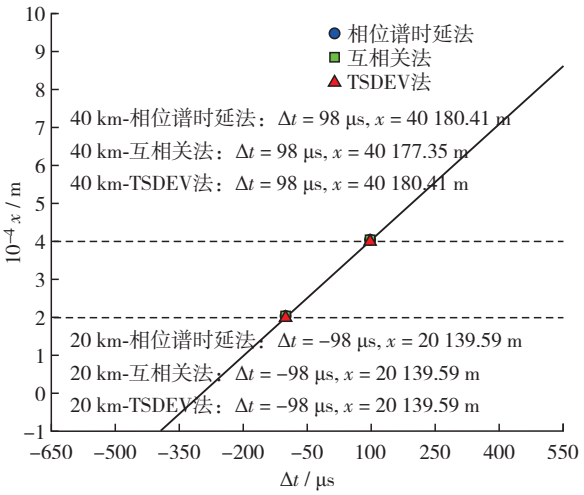


图4　PZT作为振动源时3种方法定位结果

Fig. 4　(Color online) Positioning results of phase spectrum time-delay method (circles), cross-correlation method (squares), and TSDEV method (triangles) with a PZT as the vibration source.

为了进一步评估3种定位方法的稳定性，仅将振动信号施加于 20.09 km处，重复以上实验，共采集60组振动数据，采用3种方法进行定位，结果见图5. 可见，3种方法的定位精度相差不大，主要是因为实验室环境比较稳定，使用PZT产生的振动生成的相位信号幅度较大；而相位谱时延法的优点在于其可以实现多点振动信号的定位[21].

4.2　敲击振动信号测试

实际中的振动信号往往呈现非周期性特征，如地震、撞击或机械振动等，因此，测试系统对于非周期振动信号的定位精度更具实际意义. 实验以顺时针方向为基准，在光纤 20.09 km 和 40.23 km 处以敲击的形式施加振动，解调得到 40.23 km 处的振动相位信号时域结果见图6. 可见，滤波后的信号显示出清晰的敲击振动波形，相位的显著波动是实现定位的关键.

对图6结果进行FFT后得到的频谱信息见图7. 可见，信号包含多个频率分量，频谱特征表现为宽频带信号，其中，主频处的峰值特性为信号分析和定位提供依据.

图8为在 20.09 km 和 40.23 km 采用敲击振动后的定位结果. 可见，互相关和TSDEV方法依然可以实现较为准确的定位，而相位谱方法因为非周期信号的主频一致性较弱，使得无法准确对齐不同信号的相位信息，定位结果出现错误.

http://journal.szu.edu.cn

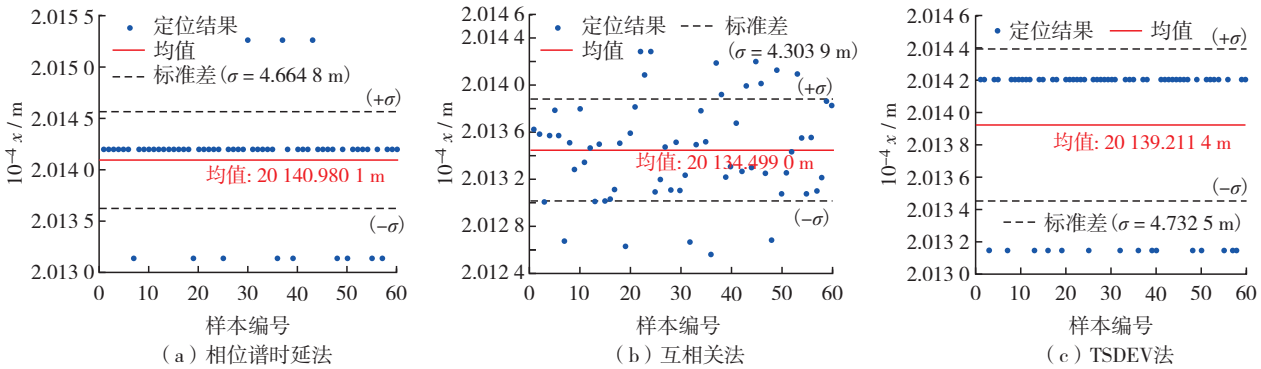


图5 PZT产生的周期振动信号在3种方法下的定位结果与精度

Fig. 5 (Color online) Positioning results and accuracy of periodic vibration signals generated by PZT under (a) phase spectrum time-delay method, (b) cross-correlation method, and (c) TSDEV method. The solid line and dashed line are for the average and standard deviation of results, respectively.

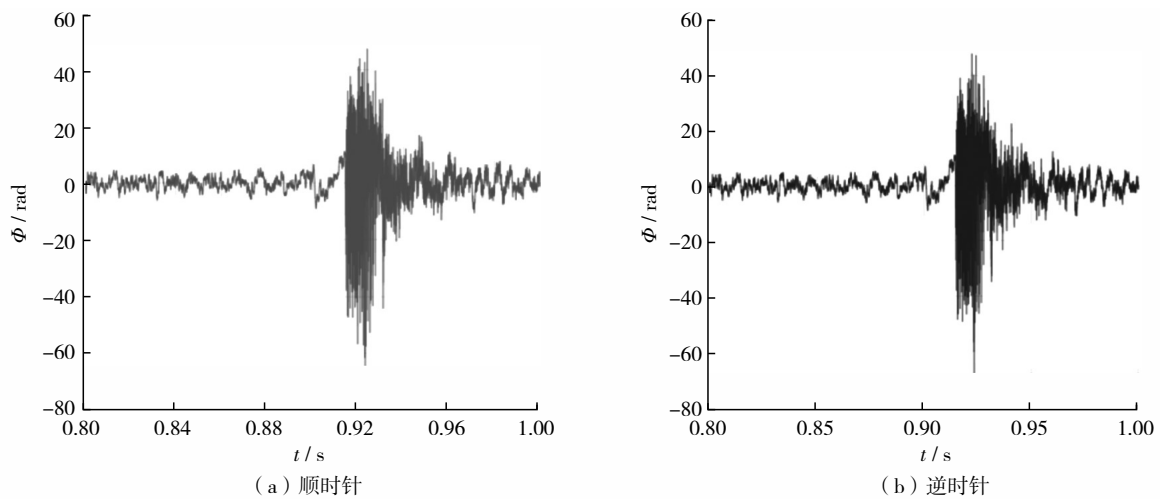


图6 解调后相位信号的时域特征（40.23 km处）

Fig. 6 Time-domain characteristics of the demodulated (a) clockwise and (b) counterclockwise phase signal at 40.23 km.

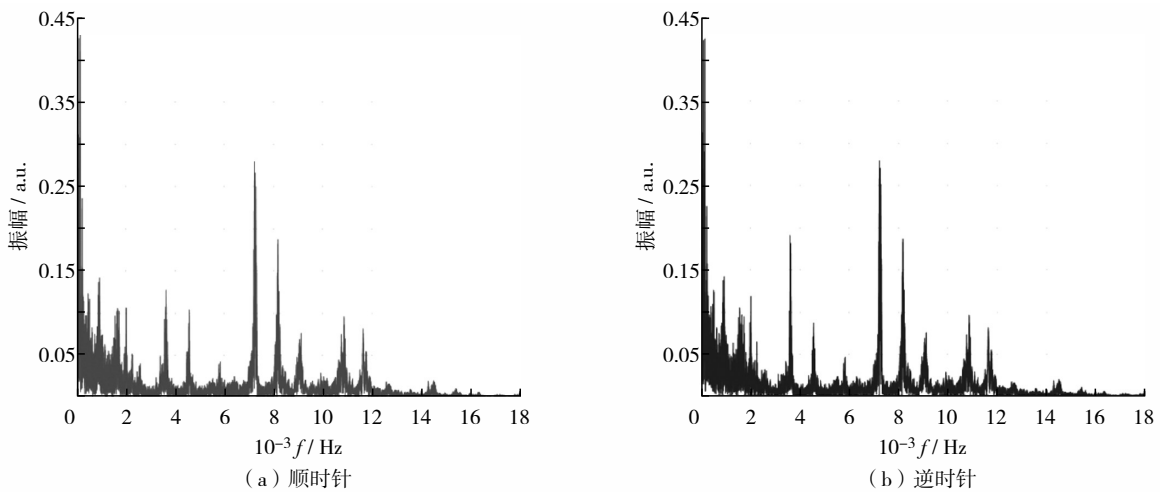


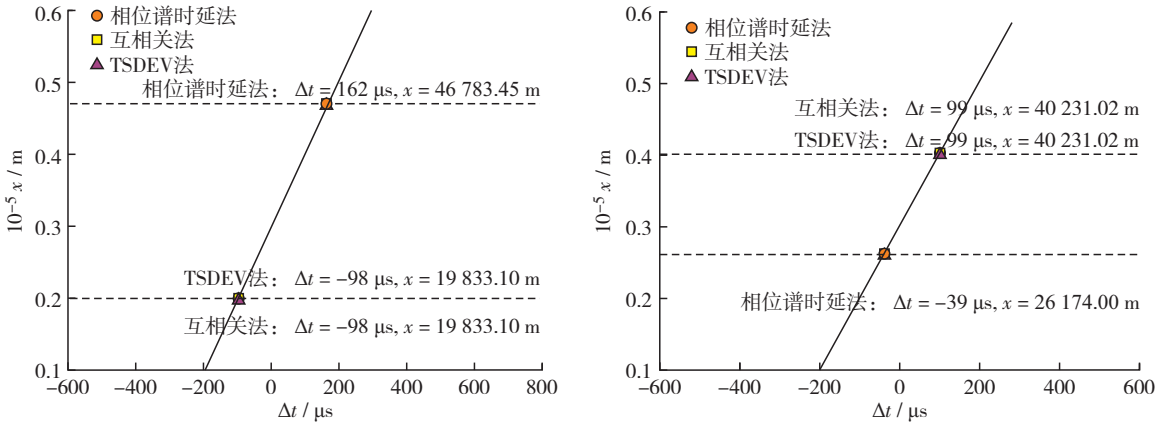
图7 解调后相位信号频谱特征（40.23 km处）

Fig. 7 Frequency-domain characteristics of the demodulated (a) clockwise and (b) counterclockwise phase signal at 40.23 km.

4.3 定位精度测试结果

实验中声波、温度及偏振态等因素均会直接影响定位结果，为保证定位结果的准确性，将传感光纤盘放入隔音箱中，把振动部分的光纤引出隔音

http://journal.szu.edu.cn



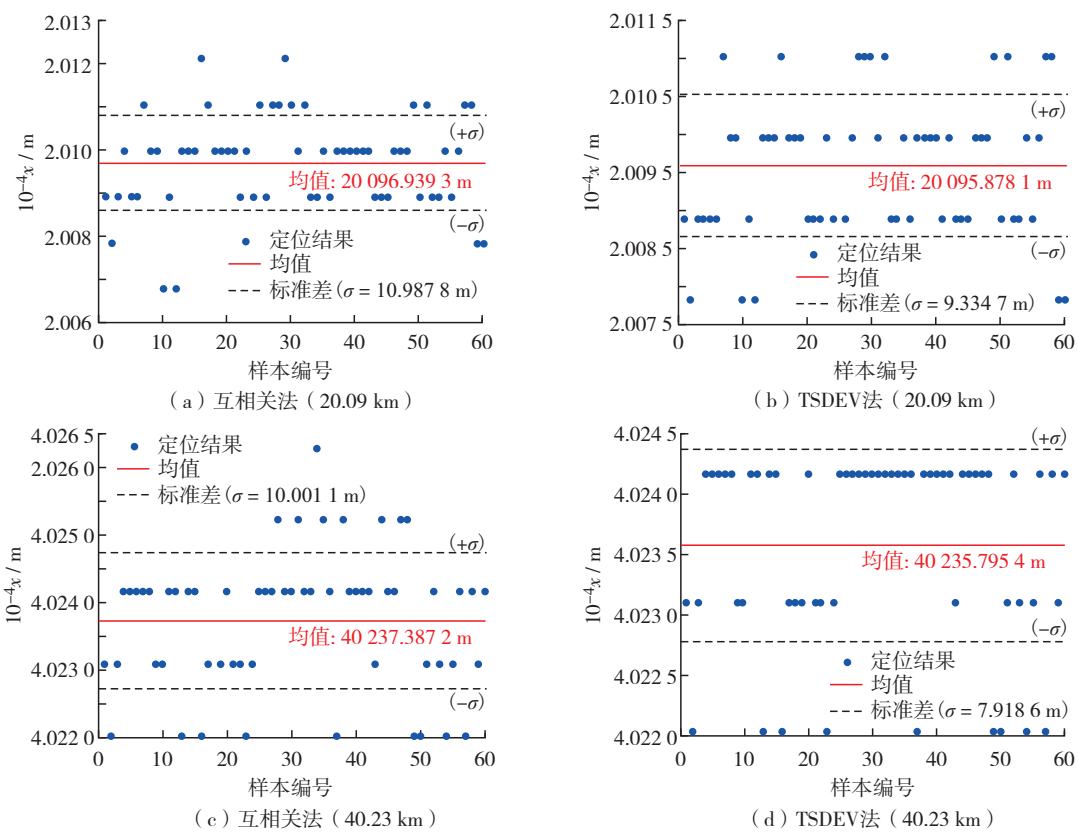
（a）20.09 km　　（b）40.23 km

图 8　敲击振动下 3 种方法的定位结果

Fig. 8　(Color online) Positioning results of vibrations induced by tapping under phase spectrum time-delay method (circles), cross-correlation method (squares), and TSDEV method (triangles) at sensing fiber length of (a) 20. 09 km and (b) 40. 23 km, respectively.

箱，并保持实验环境温度稳定；在布放光纤过程中，尽量减少急弯和应力集中，并保证振动位置光纤两端的稳定.

在光纤长度 20. 09 km 和 40. 23 km 处，各采集 60 组敲击振动数据，分别采用互相关法和 TSDEV 法进行定位，结果见图 9. 可见，20. 09 km 处基于互相关法和 TSDEV 法得到的定位结果标准差分别为 10. 99 m 和 9. 33 m；40. 23 km 处基于互相关法和 TSDEV 法得到的定位结果标准差分别为 10. 00 m 和 7. 92 m.



（a）互相关法（20.09 km）　（b）TSDEV 法（20.09 km）

（c）互相关法（40.23 km）　（d）TSDEV 法（40.23 km）

图 9　敲击振动定位结果与精度

Fig. 9　(Color online) Positioning results (circles) and accuracy of tapping vibration of (a) cross-correlation method and (b) TSDEV method at sensing fiber length of 20. 09 km, (c) cross-correlation method and (d) TSDEV method at sensing fiber length of 40. 23 km. The solid line and dashed line are for the average and standard deviation of results, respectively.

http://journal.szu.edu.cn

本环状系统使用示波器的采样率为9.62 MHz，对应的空间分辨率约为10.6 m，但实际的定位精度并不等同于理论空间分辨率大小，定位误差的上限由克拉美-罗下界决定[22]. 在传感光纤上20.09 km及40.23 km处分别使用互相关方法和TSDEV方法得到的定位结果显示，TSDEV方法下的定位结果标准差相较于互相关法更小，定位结果更稳定.

结 语

针对地下管道振动监测中的信号定位问题，采用基于马赫-曾德干涉仪的前向传输分布式振动传感技术，研究相位谱、互相关以及TSDEV方法在周期和非周期性振动信号中的定位性能. 结果表明，针对周期性信号，3种方法均能实现精准定位；对于非周期性信号，互相关和TSDEV方法表现出较高的精度与稳定性，相位谱方法则因主频一致性差，无法准确对齐信号相位，导致定位误差较大. 在总长度为60.32 km的传感光纤上，能够成功实现敲击振动信号的定位，定位精度约为10 m.

TSDEV方法相较于互相关法其定位精度虽然更高，但互相关法的计算复杂度相对较低，结合现场可编程门阵列(field programmable gate array，FPGA)和图形处理器(graphics processing unit，GPU)等硬件加速手段能够实现长距离振动信号的实时监测与定位. 前向传输分布式振动传感具备较高的相位灵敏度，且传感光缆通常具有坚固的护套结构，可在地下环境发生振动时保持较高稳定性，但仍可能受到温度波动和老化效应的影响，导致相位漂移和信噪比下降，从而影响定位精度.

本研究仍存在一定不足，实验主要针对单一振动源场景，当多个振动源同时存在时，无法分离各个振动源并实现精确定位. 因此，未来工作将聚焦于多点振动信号的定位方法研究，并结合高效算法优化与稳定的链路补偿技术，以提升系统在地下管道安全监测中的实用性与可靠性.

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFE0111400)；国家自然科学基金资助项目(W2532046，62275172，U22A2088)；深圳市基础研究计划资助项目(JCYJ20241202124408012，JCYJ20220818095800001)；深圳市科技计划资助项目(深圳市超快激光微纳米制造重点实验室ZDSYS20220606100405013)；深圳大学科研仪器研制培育资助项目(2023YQ027)；中核领创资助项目

作者简介：卢骏宏(2410232076@mails.szu.edu.cn)，深圳大学硕士研究生. 研究方向：跟踪定位分布式光纤传感.
刘国强(2400233054@mails.szu.edu.cn)，深圳大学硕士研究生. 研究方向：分布式振动传感、三维空间振动定位.
卢骏宏和刘国强为共同第一作者.

引 文：卢骏宏，刘国强，杜林锹，等. 基于敲击振动的长距离分布式定位方法[J]. 深圳大学学报理工版，2026，43(2)：187-195.

参考文献 / References：

[1] 住房城乡建设部. 2023年中国城市建设状况公报[EB/OL].[2025-01-10]. http://www.xjaepi.org.cn/upload/portal/20241031/f4c143311b2bbfd0a3fdea86628a6a60.pdf.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. 2023 China urban construction status bulletin [EB/OL]. [2025-01-10]. http://www.xjaepi.org.cn/upload/portal/20241031/f4c143311b2bbfd0a3fdea86628a6a60.pdf. (in Chinese)

[2] 中国测绘学会地下管线专业委员会. 全国地下管线事故统计分析报告[R]. 北京：中国测绘学会地下管线专业委员会，2023.
Underground Pipeline Professional Committee of Chinese Society for Geodesy, Photogrammetry and Cartography. National underground pipeline accident statistical analysis report [R]. Beijing: CSGPC, 2023. (in Chinese)

[3] KORLAPATI N V S, KHAN F, NOOR Q, et al. Review and analysis of pipeline leak detection methods [J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2022, 2(4): 100074.

[4] LIU Jingjing, GAO Jinliang, QI Jiaran, et al. Synthetic aperture radar imaging simulation of leakage in underground water supply pipeline [C]// Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Piscataway, USA: IEEE, 2024: 1-3.

[5] CHENG Mengfei, ZHANG Weiwei, ZHANG Chenqi, et al. Application of chaotic information entropy for ultrasonic guided wave detection in pipe [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14(1): 29-39.

[6] UGALDE A, BECERRIL C, VILLASEÑOR A, et al. Noise levels and signals observed on submarine fibers in the Canary Islands using DAS [J]. Seismological Society of America, 2022, 93(1): 351-363.

[7] GORSHKOV B G, YÜKSEL K, FOTIADI A A, et al. Scientific applications of distributed acoustic sensing: state-of-the-art review and perspective [J]. Sensors, 2022, 22(3): 1033.

[8] DING Zhenyang, WANG Chenhuan, LIU Kun, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1072.

[9] CAI Qinlin, ZHU Songye. Optical frequency domain re-

http://journal.szu.edu.cn

flectometry sensing for damage detection in long-span bridges using influence surface [J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(5): 3465-3480.

[10] GUO Haohan, HUA Peidong, DING Zhenyang, et al. Elimination of side lobe ghost peak using wiener deconvolution filter in OFDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(21): 7208-7218.

[11] CHEN G Y, LIU Kuan, RAO Xing, et al. Long-range distributed vibration sensing using phase-sensitive forward optical transmission [J]. Optics Letters, 2023, 48(18): 4825-4828.

[12] HUANG Jingwei, CHEN Yongchao, PENG Hekuo, et al. A 150 km distributed fiber-optic disturbance location sensor with no relay based on the dual-Sagnac interferometer employing time delay estimation [J]. Optics Communications, 2021, 479: 126420.

[13] KONG W, LIU F, ZHU G, et al. Localization enhancement of forward-transmission distributed vibration sensors using phase differentiation endpoint amplification [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(11): 17669-17676.

[14] ZHAO Zhiyong, SHEN Li, DANG Yunli, et al. Enabling long range distributed vibration sensing using multicore fiber interferometers [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3685-3688.

[15] 李健，赖平．埋地管道典型异常事件信号特征提取方法研究[J]．传感技术学报，2010，23(7)：968-972.
LI Jian, LAI Ping. Study on feature extraction method for typical abnormal events of buried pipelines [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(7): 968-972. (in Chinese)

[16] SAHA S K. Principles of interference [M]// SAHA S K. Aperture Synthesis: Methods and Applications to Optical Astronomy. New York, USA: Springer, 2011: 31-49.

[17] MA Pengfei. A fast positioning method for long-range asymmetric interferometer disturbance sensors [J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 117: 103822.

[18] 李皓然，李楚瑞，赵栋，等．MZ-Sagnac干涉型分布式光纤振动传感技术研究进展[J]．激光与光电子学进展，2024，61(13)：91-110.
LI Haoran, LI Churui, ZHAO Dong, et al. Research progress on MZ-Sagnac interferometric distributed optical fiber vibration sensing technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(13): 91-110. (in Chinese)

[19] PANG Zhongwang, WANG Guan, WANG Bo, et al. Comparison between time shifting deviation and cross-correlation methods [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 3003-3009.

[20] WANG Guan, PANG Zhongwang, ZHANG Bohan, et al. Time shifting deviation method enhanced laser interferometry: ultrahigh precision localizing of traffic vibration using an urban fiber link [J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 433-443.

[21] RAO Xing, DAI Shangwei, CHEN Ming, et al. Multi-point vibration positioning method for long-distance forward transmission distributed vibration sensing [J]. Optics Express, 2024, 32(17): 30775-30786.

[22] LIU Kun, JIN Xibo, JIANG Junfeng, et al. Interferometer-based distributed optical fiber sensors in long-distance vibration detection: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(22): 21428-21444.

【中文责编：方圆；英文责编：溯心】

http://journal.szu.edu.cn