

基于 QPSO 的震动传感器片上相位补偿器设计方法

贺斌¹, 李剑¹, 马翔翔¹, 庞润嘉¹, 展勇忠², 邹宇³, 刘宁³

(1. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051;

2. 湖南云箭集团有限公司, 长沙 410100;

3. 内蒙航天动力机械测试所, 呼和浩特 010076)

摘要: 震动传感器的系统相位非一致性会对地震波到时差提取产生很大的误差, 严重影响震源定位精度; 针对这一问题, 提出了一种基于量子粒子群优化算法 (QPSO) 的震动传感器片上相位补偿器设计方法; 首先对震动传感器进行相位标定, 获得传感器与参考传感器的相位差; 其次设计基于 QPSO 算法的相位补偿滤波器对相位差进行修正, 使其无限趋近于 0; 最后, 将相位补偿滤波器封装成 FPGA 软核部署于 FPGA 上, 完成对震动传感器的相位片上实时补偿; 为了验证该方法的性能, 将相位补偿滤波器部署于自研的多通道震动信号采集系统上, 对 8 个相同型号震动传感器进行相位一致性校准; 试验结果表明, 在震动传感器频响范围内, 该方法可以将 2.5° 内的传感器相位差实时修正至 0.004 4° 以下, 实现了震动传感器阵列的相位一致性实时校准; 该成果在地下浅层震源定位领域具有较强的应用价值。

关键词: 震源定位; QPSO; 相位一致性; FPGA 软核; 相位补偿滤波器; 片上解算

Design Method of On-chip Phase Compensator for Vibration Sensors Based on QPSO

HE Bin¹, LI Jian¹, MA Yixiang¹, PANG Runjia¹, ZHAN Yongzhong², ZOU Yu³, LIU Ning³

(1. Shanxi Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University, Taiyuan 030051, China;

2. Hunan Vanguard Group Co., Ltd., Changsha 410100, China;

3. Inner Mongolia Aerospace Power Machinery Testing Institute, Hohhot 010076, China)

Abstract: The system phase of vibration sensors has the characteristic of inconsistency, resulting in significant errors in the extraction of time differences of seismic waves, which severely affects the localization accuracy of earthquake source. To address this issue, an on-chip phase compensator method for vibration sensors based on quantum particle swarm optimization (QPSO) algorithm is proposed. Firstly, the vibration sensors are calibrated the phase to obtain the phase difference between the sensor and the reference sensor. Then, a phase compensating filter based on QPSO algorithm is designed to correct the phase difference infinitely close to zero. Finally, the phase compensating filter is implemented as an FPGA soft core, and it is deployed on FPGA to achieve the real-time on-chip phase compensation for the vibration sensors. To verify the performance of this method, the phase compensating filter is deployed on a self-developed multi-channel vibration signal acquisition system, and the phase consistency calibration of 8 identical vibration sensors is implemented. Experimental results show that within the frequency response range of the vibration sensors, the proposed method can real-time correct the sensor phase difference within 2.5° to below 0.004 4°, achieving the real-time phase consistency calibration of the vibration sensor array, and it has a strong application value in the field of shallow earthquake source localization.

Keywords: earthquake source localization; QPSO; phase consistency; FPGA soft core; phase compensating filter; on-chip computation

0 引言

地下浅层震源定位技术是一种利用地震波传播的原理, 通过测量地震波到达震动探测节点的时间、方向和振幅等信息, 推断出震源位置的测量技术。这种技术不仅在能源

勘探^[1]、管道安全监测^[2]、地质勘探^[3]、地震监测^[4]等领域中具有较大的民用价值, 同时也在弹药地下炸点定位、爆炸毁伤评估、人工爆炸和微差爆破^[5]等领域具有重要的军事应用价值。

在地下浅层震源定位过程中, 主要借鉴地震震源定位

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62271453)。

作者简介: 贺斌(2000-), 男, 硕士研究生。

李剑(1985-), 男, 教授, 博士研究生导师。

引用格式: 贺斌, 李剑, 马翔翔, 等. 基于 QPSO 的震动传感器片上相位补偿器设计方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 346-352.

方法, 利用震动波到达各震动探测节点的时间差, 构建到时时差定位方程实现定位^[6-10], 其中, 时间差的计算精度直接决定了震源定位的准确性和精度^[11]。在面对信号强度大、上升速度快的定位情况时, 通过应用相关算法对节点间获取的第一个脉冲信号进行处理, 可以获得精度较高的时差信息, 从而实现较高的定位精度^[12]; 然而在地下浅层震源定位过程中, 由于震动波信号幅度较小、上升速度较慢以及波形混叠较为严重, 因此最初的脉冲峰值点并不一定是全波最强的峰值点^[13]。如果将其误认为是震动波到达的第一个脉冲, 那么所得到的时差信息将存在较大的误差, 进而对定位精度产生较大的影响。为了提升地下浅层震源的定位精度, 文献 [14] 通过提取地震波中优势频率的相位, 并配合节点间的初至波到达时间, 成功地提高了到时时差的提取精度, 从而有效提升了震源的定位精度。然而, 由于生产工艺的限制, 震动传感器的频率响应特性存在差异, 导致不同频率的信号经过传感器后产生不同的延迟, 即震动传感器存在固有相位误差^[15]。这种相位误差是由其生产工艺造成的, 因此只能减小而无法彻底消除。在提取地震波优势频率的相位差过程中, 震动传感器的固有相位误差会导致所提取的相位差是传感器相位误差和优势频率相位差的叠加; 如果不对震动传感器固有相位误差进行消除, 将会影响时差提取和定位的精度。因此, 在高精度到时时差提取前需要对震动传感器固有相位误差进行消除。

目前减小传感器系统相位误差的方法主要有以下两种: 1) 通过改善震动传感器的结构和材料, 使其动态特性更加优秀^[16]。这种方法主要是通过优化传感器的设计和制造过程, 使其能够更准确地捕捉和响应震动信号。这种方法虽然有效, 但是对成本和工艺有很大要求, 受制造业和材料水平的限制, 这种传感器校准方法短期内难以实现。2) 在传感器后串接一个补偿器以提高传感器动态特性^[17]。这种方法主要是通过通过在传感器信号处理电路中增加一个补偿环节, 以对传感器的输出信号进行校正和补偿。这种方法无需依赖传感器的动态模型, 直接对传感器输出信号进行处理。针对补偿环节的构建, 国内外学者提出了基于群体智能算法、神经网络算法等方法的传感器动态补偿方法, 其中, 文献 [18] 提出了一种将粒子群优化算法与小波神经网络算法相结合的方法, 用于构建传感器模型, 该方法能够有效地避免传统反向传播 (BP, back-propagation) 神经网络模型易陷入局部最优解的问题, 同时提高训练精度; 此外, 文献 [19] 还提出了一种对函数级联型人工神经网络进行改进的方法, 使其具有更快的收敛速度和更好的鲁棒性, 并成功应用于传感器的动态补偿; 文献 [20] 则利用神经网络具有良好的逼近能力来构建传感器的动态补偿模型; 另外, 文献 [21] 还提出了一种无需知道传感器模型直接构建实时补偿系统的方法, 该方法通过设置目标函数, 以传感器理想阶跃响应和实际响应曲线之间的误差面积作为依据来估计补偿值。这些方法在电脑端均可以取得

良好的效果, 然而, 它们的运行需要强大的计算能力作为支持, 因此难以硬件电路的形式对传感器进行动态补偿。这就使得它们无法部署在传感器端, 从而无法实现实时相位校准。

针对地下浅层震源定位过程中, 由震动传感器固有相位误差导致的地震波到时时差提取精度不高、实时性低等问题, 本文提出了一种基于量子粒子群优化 (QPSO, quantum particle swarm optimization) 算法^[22]的震动传感器片上相位补偿方法。首先对震动传感器进行动态标定, 获得传感器之间的相位差; 其次将全通滤波器^[23]作为传感器的补偿环节, 使用 QPSO 智能优化算法对震动传感器之间的相位差进行修正, 使其无限趋近于 0; 然后在 MATLAB 平台仿真验证后, 将相位补偿器封装成 FPGA 软核^[24]部署于 FPGA 上; 最后将相位补偿滤波器部署于自研的多通道震动采集系统上, 使用振动台对片上相位补偿器进行系统验证, 确保可以达成震动传感器阵列的系统相位一致性校准。

1 震动传感器相位补偿方法

震动传感器的系统相位非一致性主要来源于震动传感器制造工艺有限以及采集系统的系统误差。这种系统误差导致传感器节点的相频特性不够理想, 使得被测信号的不同频率分量经过传感器节点后会存在不同程度的延迟。这种系统相位差只能减小而无法彻底消除, 因此本文提出了一种基于 QPSO 的震动传感器片上相位补偿器设计方法, 以实现震动传感器阵列的相位一致性实时校准。震动传感器相位补偿原理如图 1 所示, 采用逆滤波的方式, 将相位补偿滤波器串联在待校准传感器的输出信号后, 直接对传感器输出信号进行处理, 达到传感器阵列相位一致性实时校准的目的。

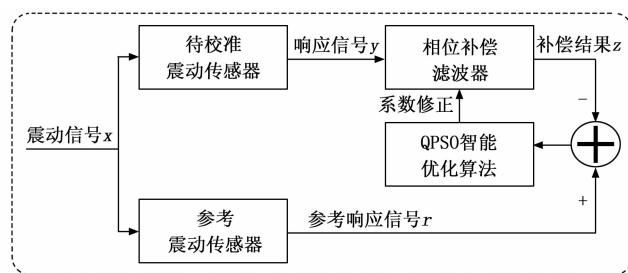


图 1 震动传感器相位补偿原理

如图 1 所示, 以震动传感器阵列中的一个阵元作为参考传感器, 将参考传感器与待校准传感器当作单输入单输出非线性系统; 将传感器的动态响应作为相位补偿滤波器的输入, 传感器的输入作为相位补偿滤波器的响应; 运用智能优化算法获取传感器逆模型作为传感器相位补偿滤波器。整个过程无需建立传感器动态模型, 直接将总输出信号最优化以满足测试需求。

1.1 相位补偿滤波器设计

根据数字滤波器的数学实现结构, 一般将数字滤波器

分为有限冲激响应 (FIR, finite impulse response) 滤波器和无限冲激响应 (IIR, infinite impulse response) 滤波器。FIR 的一般设计方法包括窗函数法、频率采样法等, 常见 IIR 数字滤波器的设计方法包括双线性变换法和脉冲响应不变法等。其中 FIR 滤波器属于非递归型的数字滤波器, 可实现线性相位滤波, 但它在频带范围内群延迟误差过大, 所以在实时音频处理, 雷达通信等领域不宜使用。相比于 FIR 滤波器, IIR 数字滤波器的优点在于: (1) 由于 IIR 引入了反馈的机制, IIR 滤波器可以使用较低的阶数, 较少的运算单元来实现相同的滤波器设计指标。(2) IIR 数字滤波器具有更高的选频特性和相对较小的群延迟误差, 更加经济和高效。因此, IIR 数字滤波器被广泛应用于低延迟, 高选频的工程领域。本文所涉及的相位补偿数字滤波器不针对信号的幅值修正, 仅对信号相位进行校准, 为保证修正相位的同时不改变信号幅值, 选用全通滤波器作为传感器逆模型, 即将全通滤波器作为相位补偿滤波器的表现形式。全通滤波器又称为相位均衡器, 其分子分母多项式系数互为倒转关系, 是一种特殊的 IIR 数字滤波器, 其幅频特性恒定为常数, 相频特性基本呈线性状态, 通常作为群延迟器使用。设计合适的全通滤波器并将其串接在待校准震动传感器后即可实现传感器相位校准。全通滤波器的 N 维系统函数为:

$$H(z) = \frac{a_N + a_{N-1}z^{-1} + \dots + a_1z^{-(N-1)} + a_0z^{-N}}{a_0 + a_1z^{-1} + \dots + a_{N-1}z^{-(N-1)} + a_Nz^{-N}} \quad (1)$$

式 (1) 中 $a_0 \sim a_N$ 表示滤波器的 N 阶系数, 其取值决定了所设计的相位补偿滤波器能否实现震动传感器的相位一致性校准, 为获得最佳的相位补偿效果, 本文采用 QPSO 智能优化算法求解最优的滤波器系数。

1.2 滤波器系数优化

1.2.1 QPSO 算法原理

QPSO 智能优化算法是在粒子群优化算法的基础上, 结合量子力学粒子运动的基本原理, 提出的一种更易收敛于全局最优解的优化算法。QPSO 算法考虑每个粒子的当前位置信息的局部最优和全局最优位置信息, 更新粒子的位置。在量子粒子群优化算法中, 粒子的状态是由波函数来确定的。粒子在空间中的位置通过薛定谔方程得出粒子出现的概率密度, 在粒子运动过程中, 第 t 次迭代时第 j 个粒子的 d 维位置函数为:

$$X_{j,d}(t) = p_{j,d}(t) \pm \frac{L_{j,d}(t)}{2} \ln\left(\frac{1}{u}(t)\right) \quad (2)$$

其中: $p_{j,d}$ 是第 j 个粒子在第 d 维的局部吸引子, $L_{j,d}$ 为势阱的特征长度, 代表了粒子更新的搜索范围大小, $u(t)$ 为 $(0, 1)$ 内的随机数。局部吸引子 $p_{j,d}$ 和特征长度 $L_{j,d}$ 的表达式分别如式 (3)、式 (4) 所示:

$$p_{j,d}(t) = \frac{\varphi_1 P_{bestj,d}(t) + \varphi_2 G_{best,d}(t)}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad (3)$$

$$L_{j,d}(t) = 2 \cdot \beta(t) \cdot |mbest - X_{j,d}(t)| \quad (4)$$

其中: φ_1 和 φ_2 是介于 0 和 1 之间的随机数, $P_{bestj,d}$ 表示粒子群的局部最优位置; $G_{best,d}$ 表示粒子群的全局最优值; β

为收缩扩张系数, 用于在全局搜索和局部收敛的惯性权重中取得平衡, 并采用动态线性递减策略, 随种群迭代次数的增加而逐步减小; $mbest$ 表示所有粒子全局极值的平均值, 用来提高粒子之间的协调能力和全局搜索能力。收缩扩张系数 β 和全局极值平均值 $mbest$ 的表达式分别如式 (5)、式 (6) 所示:

$$\beta(t) = (\beta_0 - \beta_1) \cdot \left(\frac{T-t}{T}\right) + \beta_1 \quad (5)$$

$$mbest = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_{bestj}(t) = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^N P_{bestj,1}(t), \dots, \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N P_{bestj,d}(t) \right] \quad (6)$$

其中: T 表示 QPSO 算法的迭代次数, β_0 和 β_1 为收缩扩张系数的初值和终值, 一般设置为 $\beta_0 = 1, \beta_1 = 0.5$; M 是粒子群的个数。将式 (3) ~ (6) 代入式 (2) 中, 得出 QPSO 算法中粒子的进化公式为:

$$X_{j,d}(t+1) = p_{j,d}(t) \pm \beta(t) \cdot |mbest - X_{j,d}(t)| \cdot \ln\left(\frac{1}{u}(t)\right) \quad (7)$$

粒子按照式 (7) 进行位置更新, 并且先前的粒子移动不再影响粒子的下一次位置更新, 具有更好的随机性, 群体的智能度更高。QPSO 智能优化算法理论上可以在搜索空间找到最优解, 能够很好地完成相位补偿数字滤波器最优系数的求解。

1.2.2 系数优化步骤

根据 QPSO 智能优化算法的特性, 其通过适应度函数来评估粒子当前位置的优劣。适应度函数的构建在求解相位补偿数字滤波器系数的过程中起着至关重要的作用。在本文中, 我们选择震动传感器相位差的均方误差作为适应度函数, 适应度函数具体表达式如式 (8) 所示:

$$MSE = \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \sqrt{[z(\omega) - r(\omega)]^2} \quad (8)$$

式 (8) 中, Ω 为传感器最大响应频率, ω 为信号频率, $z(\omega)$ 表示补偿后的信号相位, $r(\omega)$ 表示参考信号相位; 采用震动传感器相位差的均方误差作为评估指标, 用于衡量相位补偿滤波器的性能, 通过优化该适应度函数, 可以得到最优的滤波器系数, 从而实现对震动传感器相位的准确校准。算法结束后, 整个运行期间适应度值最小时粒子所在的位置就是算法得到的最优解, 也就是最终得到的相位补偿滤波器系数。

采用 QPSO 智能优化算法对相位补偿滤波器系数进行优化, 具体算法步骤如下。

- 1) 初始化粒子群参数, 包括种群大小 M , 粒子的维数 N , 最大迭代次数 T 。
- 2) 初始化粒子位置。
- 3) 根据目标函数式 (8) 计算各初始粒子的适应度值, 选择适应度值最小的粒子作为当代粒子群中的最优位置。
- 4) 通过式 (7) 更新每个粒子的位置; 判断当前粒子群全局最优 G_{best} 的适应度值, 将适应度最小的位置作为当前全局最优 G_{best} 。

- 5) 当未达到迭代次数时, 按照公式 (7) 继续更新粒子位置。
- 6) 随着适应度值稳定收敛, 当迭代次数达到最大值, 输出代表最佳优化结果 G_{best} 即为相位补偿滤波器系数。优化步骤流程图如图 2 所示。

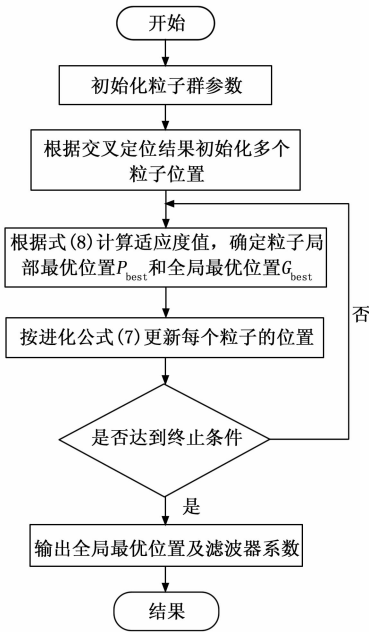


图 2 相位补偿滤波器系数优化步骤

2 滤波器硬件实现方法

FPGA 主要由逻辑单元、存储器和硬件乘法器等基本元件构成, 其设计采用硬件描述语言 (HDL) 进行编程。FPGA 具有并行执行、处理速度快、灵活性强等优点, 凭借其并行处理能力和硬件加速特性, 在信号处理领域, FPGA 能够充分发挥硬件并行性的优势, 实现高性能、低延迟和低功耗的信号处理。同时, 由于其可编程性, 开发者可以根据特定算法的需求进行定制和优化, 完成在硬件端的信号处理任务, 并真正实现实时信号处理。

震动传感器相位补偿滤波器硬件实现原理如图 3 所示, 本文采用零极点结构分离的方式, 通过求取零、极点运算结果的差, 最后利用移位操作实现除法运算即可完成一次循环运算。该过程首先利用 D 触发器对传感器输出信号 X_n [$x(n), x(n-1), \dots, x(n-N)$] 进行移位寄存, 并采用乘法器分别将传感器信号与滤波器系数 $a_0 \sim a_N$ 相乘, 其次将其相乘结果使用加法器相加即构成零点部分; 然后将滤波器输出信号移位寄存后与滤波器系数相乘, 并将乘法结果相加, 该部分实现了系统的极点; 最后在顶层模块求零极点运算结果的减法和除法运算即可得到震动传感器信号的相位补偿结果 Y_n [$y(n), y(n-1), \dots, y(n-N)$], 其中, 在进行除法运算过程中, 将系数 a_0 量化为 2 的整次幂, 通过右移运算完成除法运算。最终实现相位补偿滤波器的 FPGA 硬件部署。

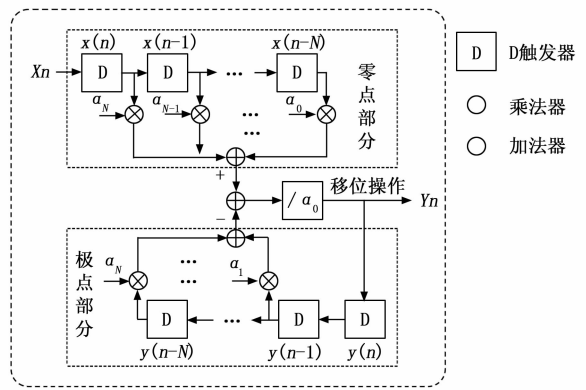


图 3 传感器相位补偿器片上实现原理图

本文所采用的硬件平台为 AMD XILINX ZYNQ 系列 FPGA, 该芯片包含一个由双核 ARM Cortex-A9 为核心构成的处理系统 (PS, processing system) 和一个等价于一片 FPGA 的可编程逻辑 (PL, programmable logic) 部分, 相位补偿滤波器部署于 ZYNQ 的 PL 部分。

3 系统仿真与验证

为验证本方法的有效性, 本文以 8 个相同型号震动传感器为例进行传感器相位一致性校准。首先对震动传感器进行相位标定, 获得传感器频响范围内的相位差; 然后在 MATLAB 仿真平台上采用 QPSO 算法对相位补偿滤波器系数进行优化; 最后将相位补偿器部署于 FPGA 上并对其进行结果验证。本文仿真实验采用的计算机为 XiaoXin CHAO5000, 系统为 Windows 10 64 位操作系统, 处理器为 Intel (R) Core (TM) i5-7200U CPU @ 2.50 GHz 2.71 GHz, 内存为 12.0 GB, 仿真软件为 MATLAB R2018b。

3.1 震动传感器相位标定

本文所使用的振动台是由苏州苏实试验仪器有限公司生产的, 具体型号为 DC-1000-15; 震动传感器为亚德诺半导体 (ADI) 公司生产的微机电系统 (MEMS, micro-electro-mechanical system) 三轴加速度传感器 ADXL354B, 其灵敏度为 200 mV/g, 量程为 ± 4 g, 频响范围为 1.9 kHz, 本次实验仅对传感器 z 轴进行相位校准; 震动信号采集平台采用自研的多通道震动信号采集系统, 采用 ZYNQ7020 作为主控芯片, 模数转换 (ADC, analog to digital converter) 芯片采用 ADI 公司的 AD7768, 在可编程逻辑 PL 部分设计震动信号采集模块, 实现对多通道震动信号的采集, 在处理系统 PS 部分定制 Linux 系统实现对震动数据的读取和传输, 该系统可实现输入信号范围 ± 4 V、量化位数 24 bit、采样率 256 ksps 的 8 通道信号同步采样。震动传感器 ADXL354B 的输出信号电压范围为 $-0.8 \sim 0.8$ V, 因此增加增益为 5 的放大电路以匹配 ADC 输入电压范围。

设定振动台的激励信号为 5~2 000 Hz 的扫频正弦信号, 驱动加速度为 9.807 m/s², 分别对 8 个震动传感器作相位标定。在激励为 200 Hz 和 2 000 Hz 下, 震动传感器输

出信号分别为图 4、图 5；将传感器 1 作为参考传感器，其他传感器的相位分别与参考传感器的相位作差，相位差结果如图 6 所示。

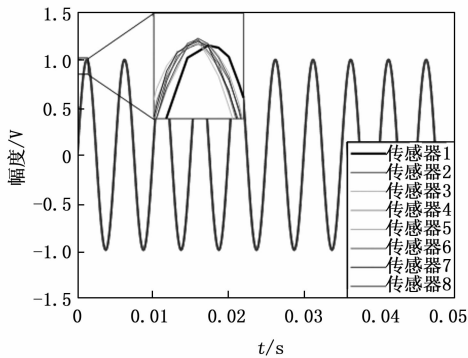


图 4 200 Hz 原始传感器输出信号

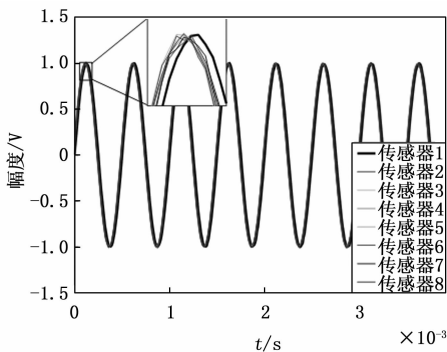


图 5 2 000 Hz 原始传感器输出信号

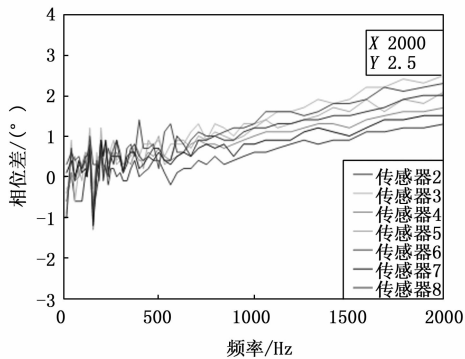


图 6 原始传感器相位差

如图 4 和图 5 所示，对于同一激励，各个震动传感器的输出信号的相位存在一定的差异；如图 6 所示，随着信号频率的升高，传感器之间的系统相位差会变大，在传感器的频响范围内，相位差最大为 2.5°。

3.2 相位补偿器系数优化

在保证相位补偿精度的基础上，减少 QPSO 算法的迭代时间以及节约部署至 FPGA 上所消耗的资源，因此将 QPSO 算法迭代次数设为 300 次，粒子个数设为 50 个，相位补偿滤波器的阶数设为 4，即粒子维数为 4。在 MATLAB 平台上运行基于 QPSO 算法的优化模型，迭代完成后，传感器 2 的适应度曲线如图 7 所示。

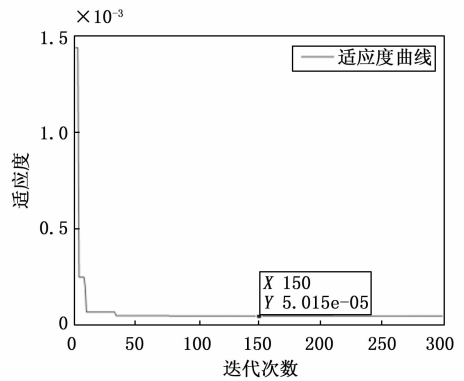


图 7 传感器 2 的粒子适应度曲线

如图 7 所示，适应度值在 50 次内急速下降，达到 100 次时基本收敛，基本满足设计要求。粒子在空间搜索的轨迹如图 8 所示。

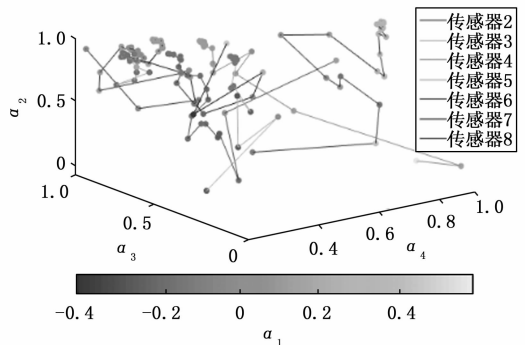


图 8 粒子搜索轨迹图

此时得出的最优的相位补偿滤波器系数如表 1 所示。

表 1 相位补偿滤波器系数

传感器编号	相位补偿滤波器系数				
	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
2	1	0.308 8	0.990 2	0.524 7	0.999 6
3	1	-0.120 3	0.848 1	0.498 8	0.459 7
4	1	0.140 5	0.865 5	0.731 7	0.492 2
5	1	-0.152 3	0.936 3	0.764 3	0.246 6
6	1	-0.154 3	0.845 8	0.657 2	0.339 9
7	1	0.136 6	0.946 2	0.845 2	0.398 9
8	1	0.055 6	0.913 0	0.810 9	0.299 7

将相位补偿器系数代入公式 (1) 中，将传感器动态标定的数据作为相位补偿滤波器的输入，补偿后的传感器相位差如图 9 所示。

结合补偿前后传感器的相位差曲线图，在传感器的通频带内，经相位补偿滤波器校准后，传感器阵列的最大系统相位差不超过 0.006°，补偿效果明显，能够满足设计要求。

3.3 硬件部署与结果验证

本文将相位补偿滤波器部署于自研的多通道震动采集系统上，首先将相位补偿滤波器封装成 AXI Stream 型软核，然后在 PL 部分将其串接在震动信号采集模块后，最终上传到 PC 端的数据即为相位校准后的震动数据。系统总体

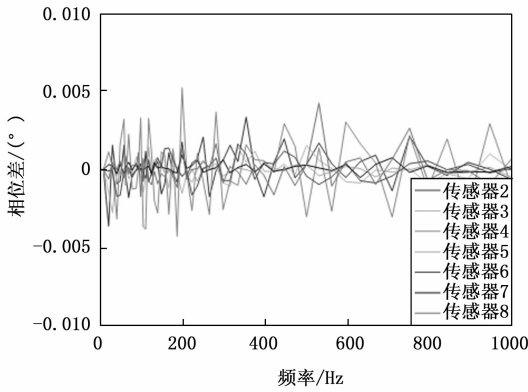


图 9 补偿后传感器相位差

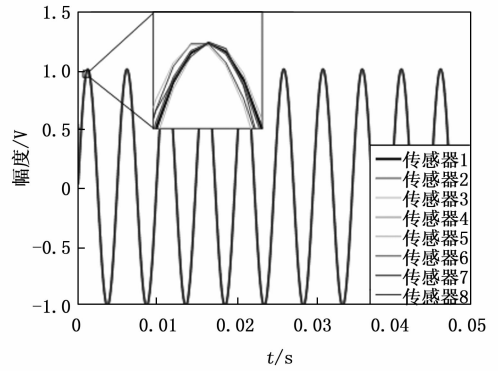


图 12 200 Hz 补偿后传感器输出信号

架构如图 10 所示。

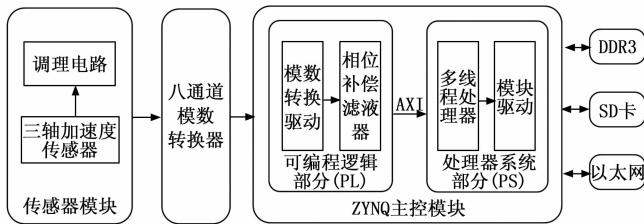


图 10 系统总体架构图

如图 10 所示, 采用加速度传感器获取震动信号, 经过调理电路后进入模数转换器中, 在 ZYNQ 芯片的 PL 部分设计模数转换驱动和相位补偿滤波器, 完成对震动信号的采集和相位补偿; 同时在 PS 部分搭载 Linux 操作系统, 利用 AXI 片内总线将 PL 部分相位校准后的震动信号传输至 PS, 并通过千兆以太网传输至 PC 端。

搭建实物平台对相位补偿器进行系统验证, 如图 11 所示, 将震动传感器安装在振动台的中央, 传感器信号输出端分别连接相位补偿器片上系统和示波器, 示波器用来观察传感器输出信号是否于与振动台参数设定保持一致, 依次对八个震动传感器进行测试; 最后将相位补偿器片上系统内的震动数据上传至 PC 端使用 MATLAB 仿真平台对信号进行分析。

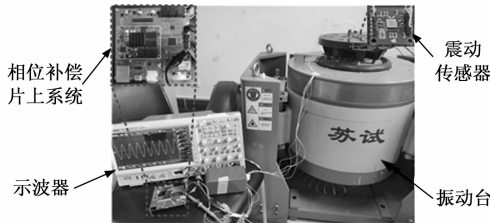


图 11 实物仿真平台

分别设定振动台的激励信号为 200 Hz 和 2 000 Hz 的正弦信号, 驱动加速度为 9.807 m/s^2 , 图 12 和图 13 分别为传感器在 200 Hz 和 2 000 Hz 激励下经过片上相位补偿器回传后的信号。

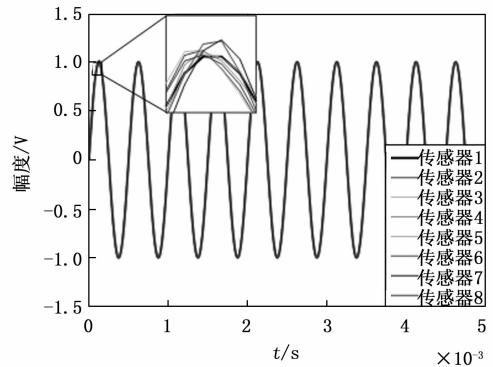


图 13 2 000 Hz 补偿后传感器输出信号

此时得到的传感器间相位差如表 2 所示。

表 2 相位差补偿结果

频率/Hz	与传感器 1 相位差	
	传感器编号	相位差/°
200	2	0.003 3
	3	0.003 7
	4	0.000 16
	5	-0.002 1
	6	0.000 48
	7	-0.000 6
	8	-0.001 7
	2 000	2
3		0.004 4
4		0.000 12
5		-0.000 11
6		-0.000 43
7		-0.002 7
8		0.003 8

从图 12 和图 13 中可以看出, 在相同激励下, 经片上相位补偿器校准后各个传感器输出的信号基本重合, 表 2 显示, 补偿后的传感器阵列的相位差不超过 $0.004 4^\circ$ 。实验结果表明, 本文设计的片上相位补偿器可以将传感器阵列的固有系统相位差修正至 $0.004 4^\circ$ 以下, 补偿效果明显, 能够实现震动传感器阵列的系统相位一致性校准。

4 结束语

本文针对地下浅层震源定位过程中, 由于震动传感器系统相位非一致性导致的定位精度不高的问题, 提出了基于 QPSO 的震动传感器片上相位补偿器设计方法。经过实验验证, 该方法能够将 2.5° 内的传感器相位差实时修正至 0.0044° 以下, 基本消除了传感器节点之间的固有系统相位差, 相位修正效果明显, 能够实现传感器阵列的相位一致性实时矫正。该成果能够为地下浅层震源高精度定位提供可靠的硬件基础。

参考文献:

[1] MCCLELLAN J H, EISNER L, LIU E, et al. Array processing in microseismic monitoring: Detection, enhancement, and localization of induced seismicity [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35 (2): 99-111.

[2] 蔺晨. 微地震震相识别及其可视化技术研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.

[3] ZHANG W, FENG X T, BI X, et al. An arrival time picker for microseismic rock fracturing waveforms and its quality control for automatic localization in tunnels [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104175.

[4] 赵石柱, 张勇, 闫新义. Sg、Sn 震相对新疆及相邻地区速报地震定位的影响分析 [J]. 内陆地震, 2021, 35 (3): 237-244.

[5] 庞珂. 基于能量聚焦的地下浅层多震源高精度扫描定位方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.

[6] 徐耀松, 谭亮. 基于改进拟牛顿-K 近邻的 TDOA 定位算法 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (10): 1578-1583.

[7] LI L, BECKER D, CHEN H, et al. A systematic analysis of correlation-based seismic location methods [J]. Geophysical Journal International, 2018, 212 (1): 659-678.

[8] 田宵, 张雄, 张华, 等. 全干涉成像的微地震定位方法研究 [J]. 地球物理学报, 2020, 63 (8): 3105-3115.

[9] 侯新荣, 郭振威, 高大维, 等. 地震定位方法最新进展综述 [J/OL]. 地球物理学进展: 1-18. [2023-11-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20231103.1423.036.html>.

[10] 耿福明. 面向信号的 ATS 仪器控制模块与 TPS 生成工具的实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[11] 刘昕. 面向信号的测试资源映射技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[12] 林志文, 贺喆, 刘松风. 基于 ATML 的系统级 TPS 开发及综合诊断应用 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (5): 1010-1016.

[13] 于雅丽, 齐同斌. 基于 ATML 的 ATS 软件平台的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, (2020), 27 (12): 138-141.

[14] 胡宇, 文永康. 基于 ATML 的 D 矩阵诊断模型实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 12-28.

[15] 刘泽民, 李世文. 基于 PCA 和 HMM—支持向量机的故障诊断方法设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 370

[10] GUO H, ZHANG H. Development of double-pair doubledifference earthquake location algorithm for improving earthquake locations [J]. Geophys. J. Int., 2017, 208 (1): 333-348.

[11] 李自红, 陈慧. 地震定位方法研究综述 [J]. 山西煤炭, 2018, 38 (1): 35-40.

[12] 刘晓佳, 李剑, 刘代劲, 等. 基于时窗熵的冲击波到时提取方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (3): 281-286.

[13] 金泽龙. 微地震波形初至自动拾取和震源定位效果分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.

[14] 李剑, 贺铭, 韩焱, 等. 浅层震源定位中高精度时间差测量方法 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (2): 45-51.

[15] 杨文杰, 张志杰, 王代华, 等. 压力传感器动态误差修正方法的 FPGA 实现 [J]. 传感技术学报, 2017, 30 (3): 402-406.

[16] 魏娟. 基于数字滤波器的压力传感器动态补偿设计方法 [D]. 太原: 中北大学, 2018.

[17] 付芹. 传感器的动态补偿设计及实现 [D]. 济南: 山东大学, 2021.

[18] 张媛媛, 徐科军, 许耀华. 改进 PSO 算法结合 FLANN 在传感器动态建模中的应用 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (1): 1-3+8+191.

[19] JAGDISH C. Patra, Adriaan van den Bos. Modeling of intelligent pressure sensor using function link artificial neural network [J]. ISA Transaction, 2008, 39: 15-27.

[20] 谢石林, 陈胜来, 张希农, 等. 传感器标定的神经网络杂交建模方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (22): 6-15.

[21] RICHIEDEI D, TREVISANI A. Shaper-Based Filters for the compensation of the load cell response in dynamic mass measurement [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 98: 281-291.

[22] 孙泽鹏, 李剑, 苏新彦, 等. 基于 QPSO 的微基线声阵列优化布设方法 [J]. 国外电子测量技术, 2022, 41 (8): 1-6.

[23] 王光宇. 基于 FIR 与相位补偿 IIR 滤波器的雷达回波信号处理 [J]. 无线互联科技, 2020, 17 (3): 7-9.

[24] 孙袖山, 李剑, 贺斌, 等. 基于 ZYNQ 的枪声识别系统设计 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (2): 1-6.

[16] 安茂春. 故障诊断专家系统及其发展 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (9): 1217-1219.

[17] 李涛涛, 包亮. ATML 标准结构及其应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (10): 45-49.

[18] IEEE Std 1671-2010, IEEE Standard for Automatic Test Markup Language (ATML) for Exchanging Automatic Test Equipment and Test Information via XML. [S]. 2011-7.

[19] IEEE Std 1641™-2004. IEEE Standard for Signal and Test Definition [S]. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, USA. 2005, 25 (3).

[20] TAYLOR R. Implementing the ATML test station and test adapter standards [C] //IEEE AUTOTESTCON Proceedings, 2010.