引用格式：王冠，黄丽霞，王志刚，等. 基于全聚焦算法的混凝土超声阵列探测成像方法[J]. 声学技术, 2021, **40**(4): 482-489. [WANG Guan, HUANG Lixia, WANG Zhigang, et al. A TFM based ultrasonic array detection and imaging method for concretes[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(4): 482-489.]
DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.007

基于全聚焦算法的混凝土超声阵列探测成像方法

王 冠[1]，黄丽霞[1]，王志刚[2]，卢 超[1]，陈 尧[1,3]，龙盛蓉[1]，李秋锋[1,3]
(1. 无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学)，江西南昌 330063；2. 南昌市建筑科学研究所，江西南昌 330029；
3. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室，北京 100190)

摘要：混凝土结构内含有大量的砂石、骨料以及钢筋，形成多样性的声学界面，超声在混凝土结构中的信号成分复杂，且超声能量易衰减。为了提高混凝土检测分辨率与信噪比，提出基于全聚焦算法的混凝土超声阵列检测方法。首先通过建立混凝土有限元模型，开展混凝土超声阵列仿真研究，模拟一发多收方式依次激励阵列探头，并获得检测信号；然后，为了避免噪声以及相位带来的误差，对检测信号依次进行卷积滤波、波形包络分析及信号锐化处理，获得全矩阵数据；最后，按照全聚焦算法对全矩阵数据进行处理成像，显示模型检测结果。仿真实验结果显示，与合成孔径聚焦算法比较，提出的成像算法可以取得更高的分辨率与信噪比。

关键词：混凝土结构；超声阵列；合成孔径聚焦法；全聚焦
中图分类号：TU317 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3630(2021)-04-0482-08

A TFM based ultrasonic array detection and imaging method for concretes

WANG Guan[1], HUANG Lixia[1], WANG Zhigang[2], LU Chao[1], CHEN Yao[1,3], LONG Shengrong[1], LI Qiufeng[1,3]
(1. *Key Laboratory of NDT* (*Ministry of Education*), *Nanchang Hangkong University*, *Nanchang* 330063, *Jiangxi*, *China*;
2. *Nanchang Architecture Science Institute*, *Nanchang* 33002, *Jiangxi*, *China*;
3. *State Key Laboratory of Acoustics*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: The concrete structure contains a large amount of gravel, aggregate and steel bars, which form a variety of acoustic interfaces. The signal components in the concrete structure are complex, and the ultrasonic energy is easily attenuated. In order to improve the detection resolution of concrete and the signal-to-noise ratio, a total focusing method (TFM) based ultrasonic array detection and imaging method for concretes is proposed. At first, the simulation study of the ultrasonic array detection of concrete is carried out by establishing a concrete finite element model, and in the simulation, the array probes are stimulated in the mode of "one stimulating and multi receiving" successively to get detection signals. Then, the full matrix capture data are obtained after convolution filtering, waveform envelope analysis and signal sharpening processing, so as to avoid errors caused by noise and phase. Finally, the full matrix capture data are processed for imaging according to the total focusing algorithm to display the model detection results. The simulation results show that the proposed imaging algorithm can achieve higher resolution and signal-to-noise ratio compared with the synthetic aperture focusing algorithm.

Key words: concrete structure; ultrasonic array; synthetic aperture focusing technique (SAFT); total focusing method (TFM)

0 引 言

混凝土材料作为现代主要建筑材料，使用相当广泛，例如世纪工程三峡大坝，混凝土总浇筑量达 2800 万立方米，混凝土桥梁约占我国桥梁总量的 90%[1-2]，而超声检测具有检测安全、指向性强、适用范围广等优势，在混凝土的检测中使用较多[3]。

混凝土超声检测最早在 20 世纪 50 年代，由 Leslide 等成功应用，20 世纪 50 年代中期，我国先后使用了英国、瑞典等国的混凝土无损检测设备[4]，开始了国内最早的混凝土无损检测研究，并于 20 世纪末，参照国外较为成熟的检测规范，制定了多个混凝土超声检测技术规程，极大促进了我国混凝土超声检测的发展[5]。

20 世纪 70 年代，超声 CT 技术逐渐成熟[6]，同

收稿日期：2020-06-27；**修回日期**：2020-07-24
基金项目：国家自然科学基金(11764030, 51705232)，江西省优势科技创新团队建设专项计划(20171BCB24008)，江西省自然科学基金项目(20192BAB216026)
作者简介：王冠(1996－)，男，甘肃天水人，硕士研究生，研究方向为声学检测技术。
通信作者：陈尧，E-mail: chenyao@nchu.edu.cn

时期，合成孔径成像思路开始应用于超声成像中[7]，在 20 世纪 90 年代，由孙宝申将超声合成孔径概念引入中国[8]，两种方法均在混凝土超声检测中所应用。后由李秋锋等将超声合成孔径成像技术与超声层析成像技术应用于混凝土检测中[9-10]。

相对于常规 A 扫超声检测，尽管超声合成孔径成像技术与超声层析成像技术提高了超声混凝土检测的分辨率，但在实际检测中仍有诸多问题。超声层析成像技术在对混凝土进行检测时，需要在混凝土结构一侧选择多个超声激励点，在另一侧选择多个超声接收点。在超声激励点移动探头时，容易产生操作误差，且在大坝、桥梁等较厚的混凝土结构无法选择超声接收点。在超声合成孔径成像技术对混凝土的测中，可获得的检测数据量较少，例如 SHAO 等进行的混凝土合成孔径超声检测中，使用了 12 探头阵列，获得了 12 孔径数据，数据量偏少，聚焦缺陷与平均噪声的能力较差，导致成像效果一般[11]。

混凝土超声检测的关键问题是混凝土中包含的大颗粒砂石骨料对超声的衰减极大，且多种声学界面使超声在传播过程中出现多次折射、反射与波形转换，产生大量杂波，对超声高分辨成像造成极大干扰，所以混凝土超声检测一般使用 20～200 kHz 的低检测频率来降低超声能量衰减，提高超声穿透力[12-13]。但检测频率较低时，声波会绕过小尺寸缺陷从而造成漏检。为了解决该问题，超声合成孔径聚焦算法开始应用于混凝土检测中，但由于获得的孔径信号较少，成像分辨率较差。阵列全聚焦作为更为先进的延时叠加算法，最早于 2005 年由英国学者 Holmes 等提出，优势在于可以获得更多的检测数据来提高检测质量[14]。由于获得了更多路径超声孔径信号，可以在缺陷处聚焦更多回波信号，单个回波信号中的噪声可以更有效地平均，对于超声在混凝土中的反射与散射有着更好的处理效果。

近年来，阵列全聚焦算法发展迅速，应用在复合材料与金属材料的无损检测中，均取得了良好效果，陈尧等[15-16]相位相干算法引入到阵列全聚焦算法中，通过动态加权来抑制结构噪声，Weston 等[17]研究了通过补偿校准角度与深度，进行阵列全聚焦成像，提高成像质量。

1　阵列全聚焦算法原理

延时叠加(Delay And Sum, DAS)后处理算法的理是依据反射点声时历程，对孔径信号进行延时处理与进行叠加，对检测区域的反射点进行聚焦，从而对检测区域进行重建。按照孔径信号的获得方法可分为合成孔径聚焦技术(Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT)与全聚焦(Total Focusing Method, TFM)算法。

1.1　SAFT 原理

20 世纪 70 年代，SAFT 最先应用于无线电雷达中，随着电子与信息技术的飞速发展，SAFT 在医学成像与工业无损检测中也得到了广泛应用，成为超声检测的常用工具[18-19]。

SAFT 原理是使用单个超声探头在检测区域发射并接收超声信号，沿着某一方向移动一段固定距离再进行发射与接收信号，在进行 n 次操作后，可到得 n 个超声回波信号[20]。设声速为 c，第 i 个探头坐标为 $(x_i,0)$，反射点 p 的坐标为 (x_p,y_p)，由探头 i 发出的声波与反射点作用后反射回探头 i 所经历的时间 t_i 为

$$t_i=\frac{2\sqrt{(x_p-x_i)^2+y_p^{\,2}}}{c} \tag{1}$$

则反射点 p 的幅值 $S(x_p,y_p)$ 为

$$S(x_p,y_p)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}H_i(t_i) \tag{2}$$

其中：H_i 为第 i 个探头接收的孔径信号，按照式(2)，计算检测区域每个反射点的回波幅值，最后成像区域按照回波幅值进行成像[21-22]。

1.2　TFM 原理

TFM 方法是基于 SAFT 方法发展而来的一种方法，并采用一发多收模式代替 SAFT 一发一收模式。在检测环境相同的情况下，TFM 可以获得更多的超声回波数据，从而提高成像的分辨率。其成像思路为多个探头组成探头阵列，依次在检测区域等距排开[23]，其原理图如图 1 所示。

当第一个探头激励信号时，所有探头接收回波信号并储存，接下来第二个探头激励信号，所有探头接收信号，依次进行，直到最后一个探头激励信号，所有探头接收。1 个探头激励信号便可得到 n

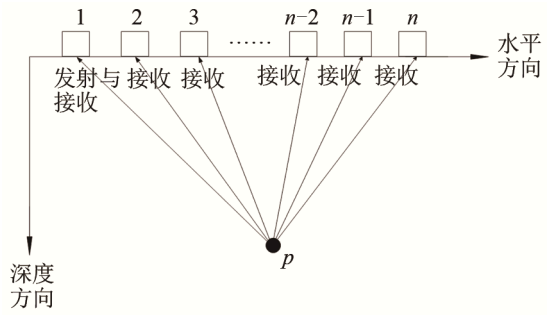


图 1　全聚焦成像原理示意图

Fig.1　Principle diagram of TFM imaging

个回波信号，这样在 n 探头阵列中，一共可得到 n^2 个回波信号，这一组回波信号称为全矩阵(Full Matrix Capture, FMC)信号[24]。设检测区域声速为 c，第 i 个探头为发射探头，坐标为 $(x_i,0)$，第 j 个探头为接收探头，坐标为 $(x_j,0)$，反射点 p 的坐标为 (x_p,y_p)，由探头 i 激励的声波与反射点作用后反射回探头 j 所经历的时间 $t_{i,j}$ 为

$$t_{i,j}=\frac{\sqrt{(x_p-x_i)^2+y_p^2}+\sqrt{(x_p-x_j)^2+y_p^2}}{c} \tag{3}$$

则反射点 p 的幅值 $S(x_p,y_p)$ 为

$$S(x_p,y_p)=\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}H_{i,j}\,t_{i,j} \tag{4}$$

式中：$H_{i,j}$ 为第 i 个探头激励信号、第 j 个探头接收的孔径信号。按照上述算法，对混凝土结构中每个反射点依次进行聚焦，最后实现结构剖面成像。

1.3 SAFT 与 TFM 对比分析

扩散角的近似计算公式为

$$\theta=\arcsin(1.22\lambda/D) \tag{5}$$

其中：θ 为超声扩散角；λ 为声波波长；D 为超声探头直径。由式(5)可知，可以使用大尺寸探头或提高激励信号频率的方法来提高横向分辨率。但受到制作工艺的限制，探头尺寸不能无限制扩大，又由于在混凝土中存在大量钢筋和砂石骨料，声学界面较多，相比于其他材料，高检测频率的能量衰减更加明显，为了增加超声的穿透力，需使用较低的检测频率。DAS 后处理算法的优势主要在于可以使用多个小孔径探头模拟大孔径探头，其原因在于小孔径的探头扩散角较大，收到的有效孔径信号也就越多，聚焦后成像质量也会越高，从而在较低的检测频率下，可获得较高的分辨率。而相比于 SAFT，TFM 可以获得更多的孔径信号，SAFT 算法在 n 次发射与接收后可得到 n 个孔径信号，TFM 在 n 次发射与接收后可得 n^2 个孔径信号，从而得到更准确的成像结果与更高的分辨率。

2 FMC 矩阵信号预处理方法

FMC 信号预处理分别完成了卷积滤波、取包络、波包锐化。阵列探头在依次进行激励与接收获得 FMC 信号后，需要进行信号预处理，重建 FMC 矩阵，可获得更高分辨率的图像。

2.1 卷积滤波

卷积是分析数学中一种重要的运算。假设 $f(x)$ 与 $g(x)$ 为两个可积函数，则卷积公式与卷积定理分别为

$$F(X)=\int_{-\infty}^{\infty}f(\tau)g(x-\tau)\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

$$F[g(x)*f(x)]=F[g(x)]F[f(x)] \tag{7}$$

式(6)为卷积公式，$F(X)$ 为 $f(\tau)$ 与 $g(\tau)$ 的卷积函数，式(7)为卷积定理，该定理指出，函数卷积的傅里叶变换是函数傅里叶变换的乘积，即一个域中的卷积相当于另一个域中的乘积。根据该定理，将激励信号与加噪声信号卷积后即可滤除大部分随机噪声，保留与激励信号频率相近的信号成分[23]。

2.2 基于希尔伯特变换取包络

为了避免延时与相位变化带来的误差，再对信号进行希尔伯特变换，可以获得信号包络[25]。希尔伯特变换可以认为是 $f(x)$ 与函数 $1/(\pi x)$ 的卷积，可表示为

$$F(x)=\int_{-\infty}^{\infty}f(\tau)\frac{1}{\pi(x-\tau)}\mathrm{d}\tau \tag{8}$$

则 $f(x)$ 的包络函数[24]可表示为

$$g(x)=\left[f(x)^2+F(x)^2\right]^{1/2} \tag{9}$$

取包络的重要意义在于 FMC 信号处理前，各信号幅值正负交替，如果直接叠加，可能会出现正负相消，导致缺陷信号淹没。取得信号包络后，信号全部大于等于零，从而避免叠加计算时淹没缺陷信号的情况发生，具体处理结果如图 2 所示。

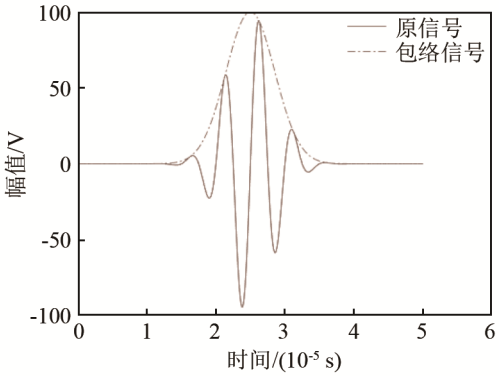


图 2 信号包络示意图

Fig.2 Schematic diagram of signal envelop

由于包络信号的频率相比原信号会变低，各峰值变宽，对于 TMF 算法，取包络后直接成像，缺陷周围会产生虚影(详见 4.2 节中图像对比)。

2.3 锐化处理

对于包络信号频率降低现象，采用锐化处理，根据超声成像思路，保留缺陷反射信号，在信号中提取幅值较高的部分，而压低该部分周围的幅值，处理后图像的极大值处会表现得更加尖锐，图 3 是锐化处理示意图。

将信号分割为数个只有单个极值的子信号，图 3 所示即为只包含单个极值的子信号，设 $k(x)$ 为任

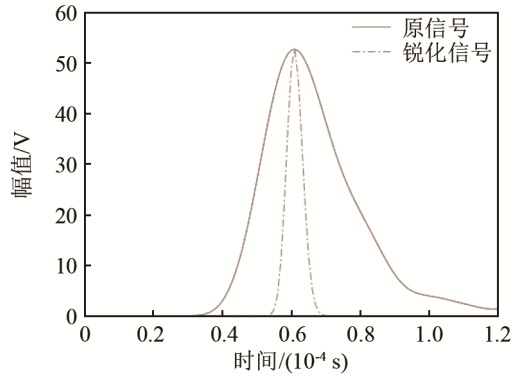


图 3　包络锐化处理前后对比效果图

Fig.3　Contrast diagram before and after envelop sharpening processing

一子信号，极值为 K，则锐化处理后的结果 $z(x)$ 为

$$z(x)=[k(x)/K]^m\cdot K \tag{10}$$

式中：m 为锐化处理系数，控制锐化处理程度需要注意，若处理过度，则成像缺陷会变得比正式情况小，所以需要通过实验得到合适的处理幅度，在本次仿真中，m 取经验值为 10。

FMC 矩阵信号预处理流程图如图 4 所示。

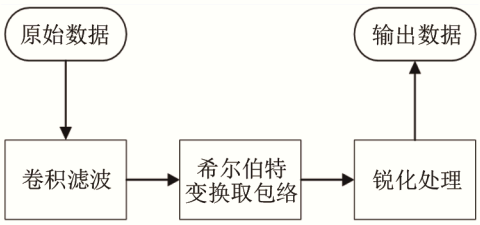


图 4　信号预处理流程图

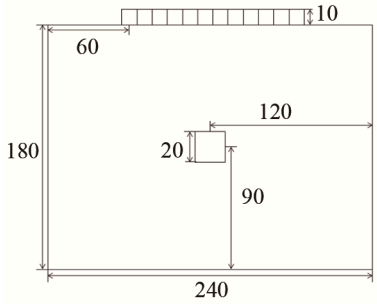
Fig.4　Flow chart of signal preprocessing

3　仿真实验与信号预处理对比

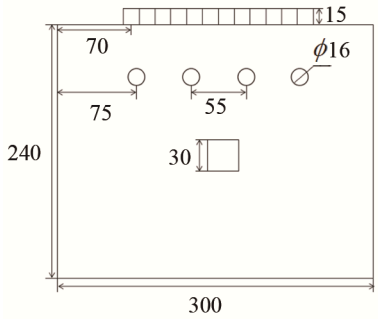
3.1　仿真检测

为了验证与改善算法，使用有限元仿真软件构建了两个模型。模型 1 是一个高为 180 mm、宽为 240 mm 的混凝土模型，其中心放置边长为 20 mm 的正方形实心钢制反射物。模型 2 是一个高为 240 mm、宽为 300 mm 的混凝土模型，内置 4 个直径为 16 mm、埋深为 50 mm 的圆形钢筋与 1 个边长 30 mm 的正方形空气缺陷。模型 1 与模型 2 均采用 12 探头阵列，可形成 12×12 的信号矩阵。首个探头分别放置于 60、70 mm 处，探头边长分别为 10、15 mm，各探头均为紧贴排布。模型 1 与模型 2 仿真结构模型如图 5 所示，图中单位均为 mm。

混凝土内超声声速设置为 4 000 m·s^{-1}，钢筋与钢制反射物超声声速设置为 6 300 m·s^{-1}，空气缺陷超声声速设置为 314 m·s^{-1}，检测采用频率为



(a) 模型1示意图



(b) 模型 2 示意图

图 5　仿真模型示意图

Fig.5　Schematic diagrams of two simulation models

100 kHz，该频率在混凝土超声检测较为常用，激励信号采用正弦调制信号：

$$h(t)=\sin(2\pi ft)\cdot\exp\left\{-\left[(t-t_p)\cdot\omega\right]^2\right\} \tag{11}$$

其中：f 为信号频率；ω 为高斯波脉宽系数；t_p 为波形周期中波包位置参数。图 6 和图 7 为超声激励信号波形与归一化频谱图。

3.2　回波波形信号处理对比

图 8 中列出了模型 1 的 6 号探头发射，1 至 12 号探头接收的归一化信号波形图，图中使用 Sn-Rm 来表示第 n 号探头发射、m 号探头接收的信号，如用 S6-R2 表示 6 号探头发射、2 号探头接收的信号。

图 8 中使用实线框标注的为直达波，使用虚线框标注的为缺陷波，使用点线框标注的为底波。可

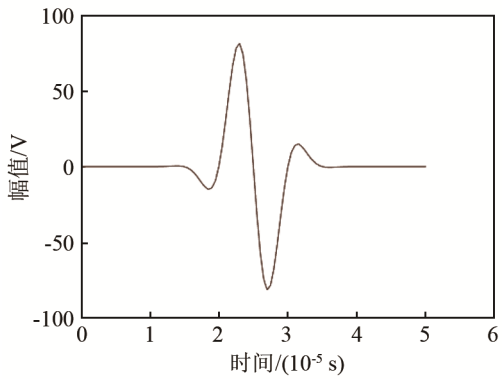


图 6　激励信号波形

Fig.6　The excitation signal waveform

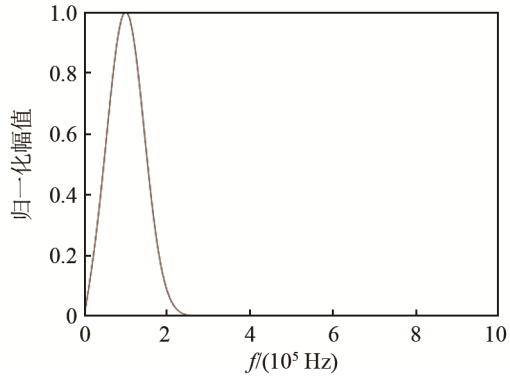


图 7 激励信号频谱图

Fig.7 The excitation signal spectrum

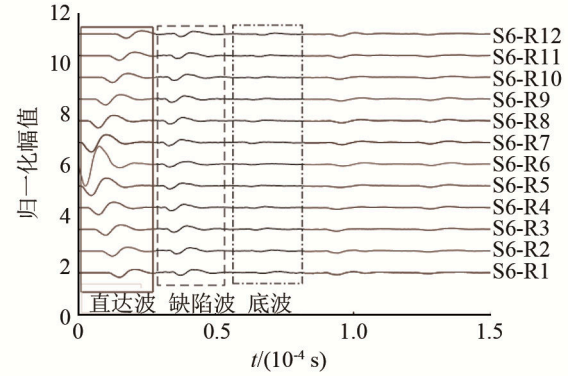
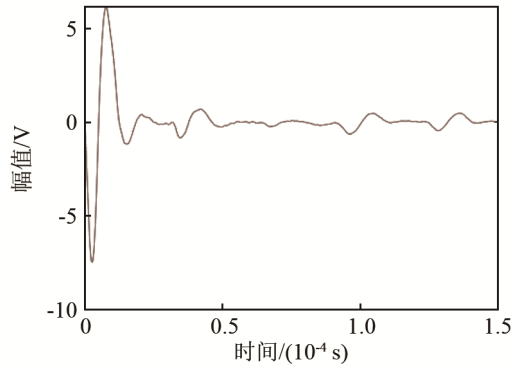


图 8 6 号探头发射时接收信号归一化波形图

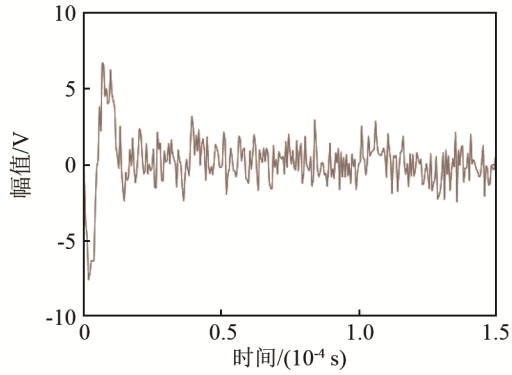
Fig.8 Normalized waveforms of the received signals when the 6th sensor is transmitting

以看出除 S6-R6 的直达波外，其他波形最初部分幅值都为 0，这是因为除了 S6-R6 为自发自收，其他探头接收直达波都需要一段时间，距离越远，时间也越长。

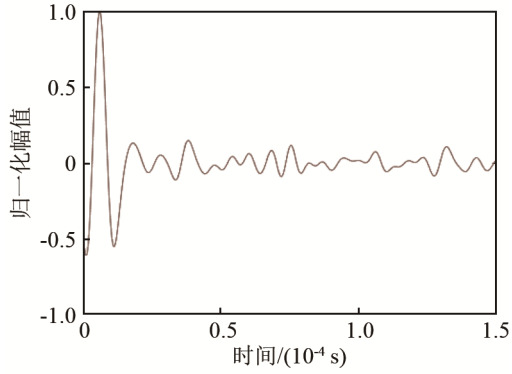
在 12 探头发射阵列中，可得到 144 个检测信号，为了对比噪声对 SAFT 与 TFM 算法的影响，在原信号中添加了信噪比为–1 dB 的高斯噪声。以模型 1、6 号探头发射，6 号探头接收到的信号为例，对比该信号在信号处理的各个阶段波形。图 9 为信号波形依次进行卷积滤波、取包络、锐化处理后每个阶段的波形。



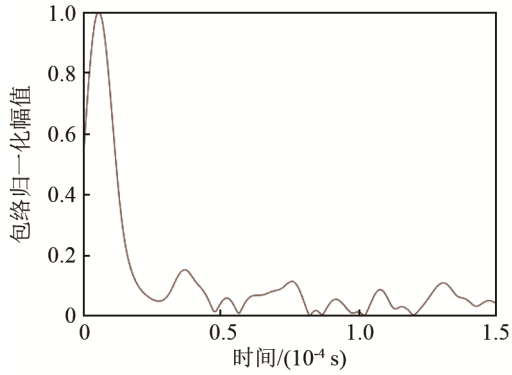
(a) S6-R6 原始信号



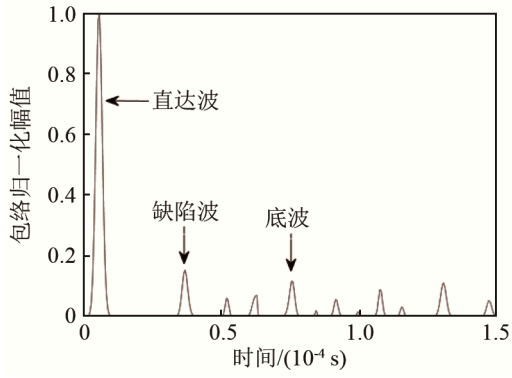
(b) S6-R6 信号添加噪声



(c) 卷积滤波归一化波形



(d) 滤波后取包络归一化波形



(e) 包络锐化处理归一化波形

图 9 加噪声的 S6-R6 对所接收信号的处理过程

Fig.9 Processing process of the received signal for the S6-R6 pair with noise

从图 9 可知，经过预处理后，加入噪声的影响基本消除，各信号中直达波、反射波、底波更加突出，虽然还存在一些随机干扰噪声，但采用 TFM 算法后缺陷反射信号将叠加增强，噪声信号则被抑制，成像分辨力将进一步提高。

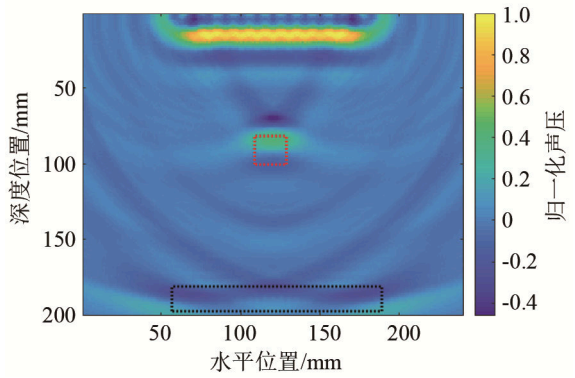
4　仿真数据成像

4.1　TFM 与 SAFT 的成像结果比较

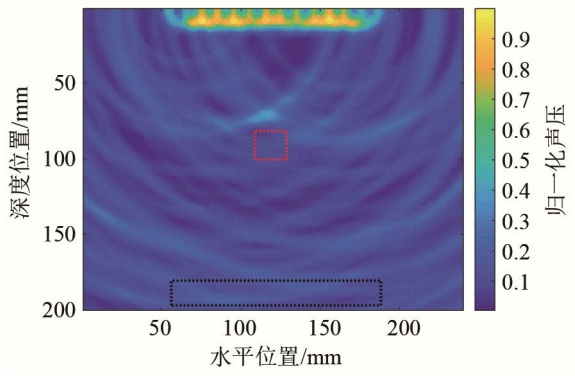
为了体现 TFM 在混凝土检测成像中的优势，分别将模型 1 与模型 2 得到的实验数据进行 TFM 与 SAFT 成像，并将结果进行比较，使用的激励信号以及信号预处理方法均相同。图 10 为模型 1 无噪声 SAFT 处理成像结果、添加噪声后的 SAFT 处理成像结果以及添加噪声 TFM 处理成像结果对比图。图 11 为模型 2 无噪声 SAFT 处理成像结果、添加噪声后的 SAFT 处理成像结果以及添加噪声 TFM 处理成像结果归一化对比图。

图 10、11 中上部黄色部分为直达波处理后形成的结果。中间部分红框标示了空气缺陷与钢制反射物所在处，下方黑框区域为探头正下方形成的平直底面。

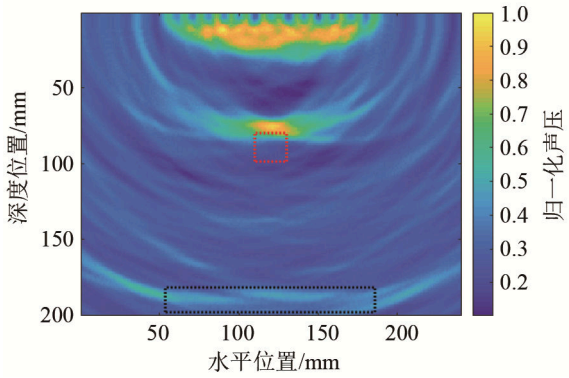
从图 10 与图 11 中可以看出，未添加噪声并用 SAFT 成像可以模糊看出钢制反射物、钢筋与空气



(a) 对无噪声信号的 SAFT 成像图



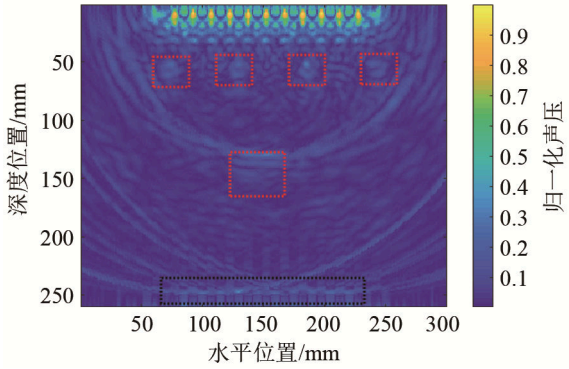
(b) 信号加噪声后 SAFT 成像图



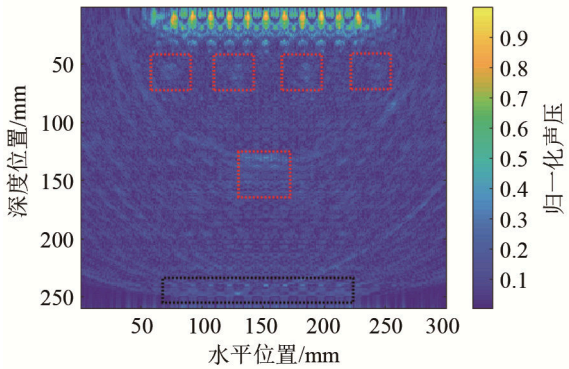
(c) 添加噪声并进行信号预处理后的 TFM 成像图

图 10　模型 1 成像结果

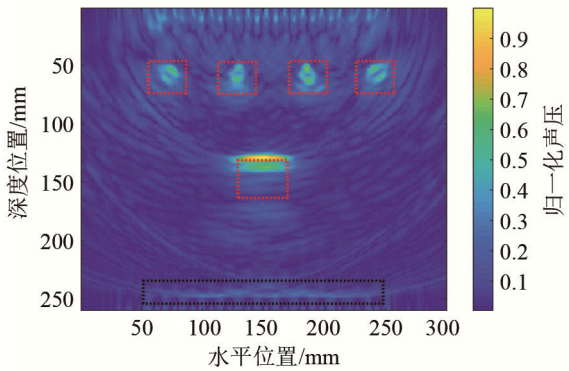
Fig.10　The imaging result processed for Model 1



(a) 对无噪声信号的 SAFT 成像图



(b) 信号加噪声后 SAFT 成像图



(c) 添加噪声并进行信号预处理后的 TFM 成像图

图 11　模型 2 成像结果

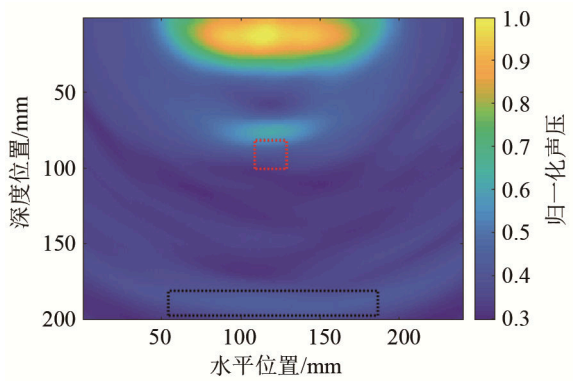
Fig.11　The imaging result processed for Model 2

缺陷，但底波不明显。当添加噪声之后使用 SAFT 成像，钢制反射物、钢筋与空气缺陷便完全淹没，无法辨别缺陷与底波。添加噪声后进行 TFM 成像，成像图准确地反映了空气缺陷与钢制反射物反射面的位置和长度，底波基本与模型底面位置吻合，但两侧有甩弧现象。这是由于在仿真探测中，非探头正下方的底波无法形成有效反射路径被探头获得，而两侧探头正下方的底波经过 TFM 处理后形成该甩弧现象。

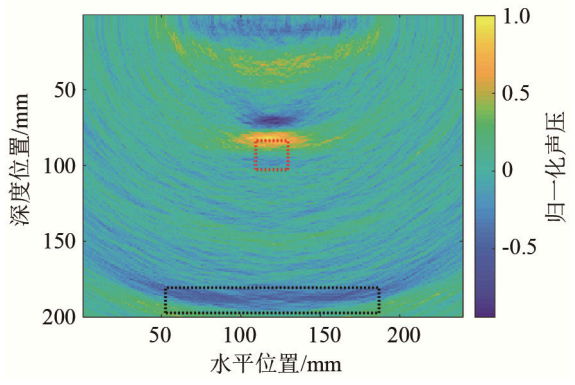
将 SAFT 处理成像结果与 TFM 成像结果对比发现，TFM 算法添加噪声后的成像分辨力也要比未添加噪声的 SAFT 处理结果更高，原因是 TFM 所获得的数据量是 SAFT 的 n 倍，例如，此次试验探头数 n=12，则 SAFT 可接收 12 个波形，而 TFM 所接收的 FMC 矩阵包含 144 个孔径信号，数据量为前者的 12 倍，所以成像分辨力大幅提升。

4.2 信号预处理效果对比

为说明卷积滤波和锐化处理的实际效果，在模型 1 与模型 2 得到的 FMC 矩阵信号预处理时，分别将未经锐化处理与未经卷积滤波的信号进行 TFM 成像并进行归一化，模型 1 处理结果如图 12 所示，模型 2 处理结果如图 13 所示。



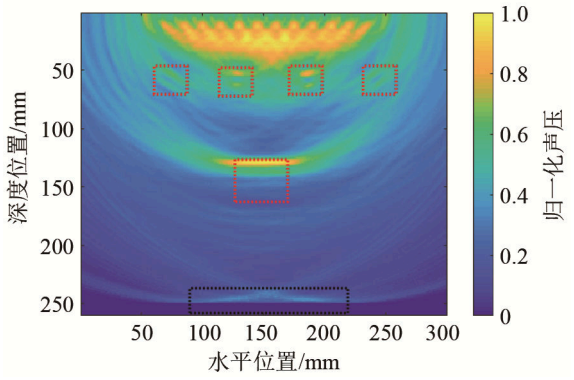
(a) 未经锐化处理的 TFM 成像图



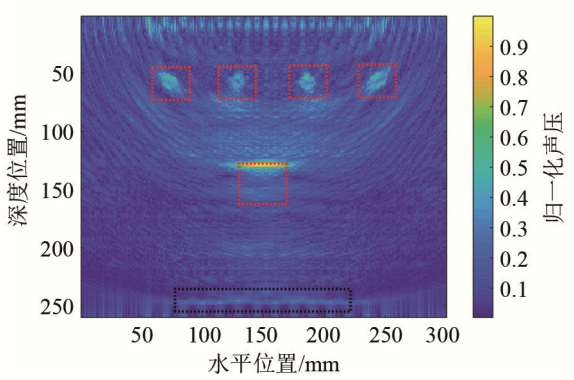
(b) 未经卷积滤波处理的 TFM 成像图

图 12 模型 1 信号预处理效果对比

Fig.12 Comparison of signal preprocessing effects for Model 1



(a) 未经锐化处理的 TFM 成像图



(b) 未经卷积滤波处理的 TFM 成像图

图 13 模型 2 信号预处理效果对比

Fig.13 Comparison of signal preprocessing effects for Model 2

将图 12、13 与图 10、11 对比可发现，未经过锐化处理的成像结果出现了散焦，相比于锐化处理后成像结果分辨力更低。未经过卷积滤波处理的成像图中，虽然聚焦效果尚可，但与滤波处理后的成像结果比较，信噪比严重受到影响。

5 结 论

本文采用 TFM 算法进行了混凝土阵列超声的仿真检测实验。将采集的 FMC 矩阵信号经过卷积滤波、取包络、包络锐化信号预处理的方式，最后进行 TFM 算法成像，取得了分辨率与信噪比较高的图像。仿真实验成像结果表明，相比于 SAFT 算法，TFM 算法可以最大限度地增加检测信号的数量，更好地抑制噪声对成像结果的干扰，聚焦叠加效果更突出，是一种高分辨混凝土超声检测成像方法，为超声阵列探测混凝土检测的工程应用提供可靠参考的依据。

参 考 文 献

[1] 郑守仁, 孙志禹, 朱红兵. 三峡工程大体积混凝土施工技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, **47**(8): 796-804.
ZHENG Shouren, SUN Zhiyu, ZHU Hongbing. Mass concrete

construction technology of the Three Gorges Project[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, **47**(8): 796-804.

[2] 刘钊. 混凝土桥梁溯源与发展思考[J]. 桥梁建设, 2013, **43**(5): 5-11.
LIU Zhao. Historical review and development concern of concrete bridges[J]. Bridge Construction, 2013, **43**(5): 5-11.

[3] 王鹏, 韩庆邦, 姜学平, 等. 混凝土表面开口裂缝对近表面声波影响[J]. 声学技术, 2017, **36**(3): 247-251.
WANG Peng, HAN Qingbang, JIANG Xueping, et al. The influence of surface opening cracks on the sound wave near concrete surface[J]. Technical Acoustics, 2017, **36**(3): 247-251.

[4] 常俊杰, 李娟娟. 合成孔径算法在混凝土检测中的应用[J]. 无损检测, 2017, **39**(4): 22-25, 30.
CHANG Junjie, LI Juanjuan. Application of synthetic aperture algorithm in the detection of concrete[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2017, **39**(4): 22-25, 30.

[5] LI Qiufeng, WANG Yu, LIU Rongmei, et al. Ultrasonic computed tomography imaging method of concrete materials based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, **32**(3): 341-347.

[6] CHAI H K, MOMOKI S, et al. Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound[J]. NDT & E International, 2011, **44**(2): 206-215.

[7] 邵志学, 石立华, 张琦. 混凝土超声检测技术的研究与实现[J]. 振动 • 测试与诊断, 2012, **32**(3): 397-401, 513.
SHAO Zhixue, SHI Lihua, ZHANG Qi. Research and realization of concrete ultrasonic detecting technology[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, **32**(3): 397-401, 513.

[8] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1993, **12**(3): 43-48.

[9] LI Q F, SHI L H, LIANG D K, et al. Research on 2D imaging technique for concrete cross section[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2010, **29**(1): 85-96.

[10] 廖寅, 熊必成, 李秋锋, 等. 混凝土结构超声阵列探头成像算法研究[J]. 压电与声光, 2012, **34**(6): 932-935, 939.
LIAO Yin, XIONG Bicheng, LI Qiufeng, et al. Study on imaging algorithm by using ultrasonic array probes for concrete structures[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, **34**(6): 932-935, 939.

[11] SHAO Z X, SHI L H, SHAO Z, et al. Design and application of a small size SAFT imaging system for concrete structure[J]. The Review of Scientific Instruments, 2011, **82**(7): 073708.

[12] 王振宇, 刘国华. 混凝土构件层析成像的试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, **38**(6): 110-114.
WANG Zhenyu, LIU Guohua. An experimental study on acoustic travel time tomography of concrete component[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, **38**(6): 110-114.

[13] 李秋锋, 马辉聪, 陈文生, 等. 改进层析算法在混凝土超声成像中的应用[J]. 失效分析与预防, 2012, **7**(2): 104-108.
LI Qiufeng, MA Huicong, CHEN Wensheng, et al. Application of improved computerized tomography algorithm in concrete ultrasonic imaging[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, **7**(2): 104-108.

[14] 章东, 桂杰, 周哲海. 超声相控阵全聚焦无损检测技术概述[J]. 声学技术, 2018, **37**(4): 320-325.
ZHANG Dong, GUI Jie, ZHOU Zhehai. A review of total focusing method for ultrasonic phased array imaging[J]. Technical Acoustics, 2018, **37**(4): 320-325.

[15] CHEN Y, LUO Z B, ZHOU Q, et al. Modeling of ultrasonic propagation in heavy-walled centrifugally cast austenitic Stainless steel based on EBSD analysis[J]. Ultrasonics, 2015, **59**: 31-39.

[16] 陈尧, 冒秋琴, 陈果, 等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, **39**(9): 128-134.
CHEN Yao, MAO Qiuqin, CHEN Guo, et al. Research on high-speed total focusing ultrasonic imaging method based on Omega-K algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, **39**(9): 128-134.

[17] WESTON M, NAGESWARAN C, SUTCLIFFE M, et al. Calibration of ultrasonic techniques using full matrix capture data for industrial inspection[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, **54**(11): 602-611.

[18] 李秋锋, 石立华, 梁大开. 基于合成孔径聚焦技术的混凝土断面二维成像方法研究[J]. 声学学报(中文版), 2008, **33**(4): 370-377.
LI Qiufeng, SHI Lihua, LIANG Dakai. Study on 2D imaging technique for concrete cross section based on SAFT[J]. Acta Acustica, 2008, **33**(4): 370-377.

[19] 吕晓光, 王明泉, 李光亚. 合成孔径聚焦超声成像在混凝土探伤中的应用研究[J]. 图学学报, 2014, **35**(6): 946-949.
LV Xiaoguang, WANG Mingquan, LI Guangya. Application of synthetic aperture focusing technique in ultrasonic detection of concrete[J]. Journal of Graphics, 2014, **35**(6): 946-949.

[20] 孙宝申. 合成孔径成像的应用及发展[J]. 应用声学, 2018, **37**(5): 787-793.
SUN Baoshen. Applications and development of synthetic aperture imaging[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, **37**(5): 787-793.

[21] 李力, 魏伟, 夏旺. 基于合成孔径聚焦技术的煤岩超声成像检测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, **47**(4): 727-734.
LI Li, WEI Wei, XIA Wang. Coal-rock ultrasonic imaging and testing research based on synthetic aperture focusing technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, **47**(4): 727-734.

[22] 李秋锋, 石立华, 金信鸿, 等. 一种改进的合成孔径聚焦算法研究[J]. 压电与声光, 2009, **31**(3): 440-443.
LI Qiufeng, SHI Lihua, JIN Xinhong, et al. Study on an improved SAFT algorithm[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, **31**(3): 440-443.

[23] 李衍. 超声相控阵全聚焦法成像检测[J]. 无损检测, 2017, **39**(5): 57-64.
LI Yan. Ultrasonic phased array imaging testing by total focusing method[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2017, **39**(5): 57-64.

[24] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, **51**(10): 1-7.
ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, **51**(10): 1-7.

[25] 胡玉平, 高鸿波, 吴伟, 等. 基于希尔伯特变换的铝/铝胶接结构缺陷尺寸的超声测量[J]. 无损检测, 2017, **39**(11): 39-43.
HU Yuping, GAO Hongbo, WU Wei, et al. Ultrasonic testing of the flaw size in the Al/Al adhesive structure based on Hilbert transform[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2017, **39**(11): 39-43.