

基于合成孔径聚焦技术的混凝土断面 二维成像方法研究^{*}

李秋锋^{1,2} 石立华¹ 梁大开²

(1 解放军理工大学工程兵工程学院 南京 210007)

(2 南京航空航天大学航空宇航学院 南京 210016)

2007 年 11 月 26 日收到

2008 年 3 月 5 日定稿

摘要 针对提高混凝土结构超声无损检测分辨率的需要,提出了两种处理方法。在对低频 B 扫描数据进行合成孔径聚焦处理时,由于低频探测信号时间宽度大,波包会被拉伸,发生波包变形现象,为此,引入波包分解技术来解决这个问题。波包分解技术实质是用一些模型参数去描述检测信号,可以避免对回波信号所有采样点进行处理,不仅解决了波包变形问题,而且可以简化计算。对于实验中商用超声传感器引起的余振问题,提出一种数字滤波的补偿方法,通过水浸方式采集数据建立传感器系统补偿模型,用于实际检测信号中振铃的抑制,可提高成像的时空分辨率。数值仿真和实验结果证明,采用这两种方法后内嵌目标定位更准确,成像分辨率明显提高。

PACS 数: 43.60

Study on 2D imaging technique for concrete cross section based on SAFT

LI Qiufeng^{1,2} SHI Lihua¹ LIANG Dakai²

(1 Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology Nanjing 210007)

(2 College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016)

Received Nov. 26, 2007

Revised Mar. 5, 2008

Abstract Two signal processing approaches are presented to improve imaging resolution in ultrasonic NDT of concrete structures. When low-frequency B-scan data are processed by Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT), wavepacket will be further elongated because low-frequency detection signal covers a relative long period. Wavepacket Decomposition Technique (WDT) is introduced here to solve this problem. This method uses a few parameters to describe the original signal so that it can avoid the processing of the whole time history of signals. In practical measurement, ringing of commercial ultrasonic transducers also affects the discrimination of the detected signal, a method based on digital filtering is proposed to build the compensation model of transducer system. By eliminate the ringings with the filter, the spatiotemporal resolution of ultrasonic imaging is improved. Numerical simulation and experimental results have proved the efficiency of the methods. Imaging resolution is improved obviously and the embedded object in a test specimen is located accurately.

引言

在混凝土超声检测中, B 扫描是显示混凝土内部结构的一种非常有效的检测方法, 一次 B 扫描就

能观察混凝土结构的一个剖面。然而这种直接成像方法的分辨率较低, 难以对很多内部异常进行准确定位。

合成孔径聚焦技术 (SAFT) 是对 B 扫描数据进

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目 (60535020)

行进一步处理的一种有效方法, 它的思想最早源于地震信号处理中偏移成像算法^[1], 而后引入到雷达信号处理领域, 形成合成孔径雷达成像技术 (SAR), 得到了广泛应用。但在混凝土超声成像中, 由于混凝土材料对高频超声波很强的衰减作用, 使得适用的工作频率很低, 再加上超声波在混凝土中传播速度很低, 还有模式转换, 结构噪声和边界反射等原因, 增加了合成孔径超声成像研究的难度, 现在还多处于实验室研究阶段^[2-5]。

合成孔径成像是用小孔径传感器合成大孔径传感器, 实现在低的工作频率下获得高分辨率, 其在图像重建过程中易于应用各种数据处理方法, 如频域、时域及统计处理等方法, 成像技术内容非常丰富^[2-7]。由于这些方法需要完成大量计算, 而且主要从宏观上进行信号处理, 对于低频信号聚焦过程没有太多关注, 分辨率很难有更高提高。

超声波在混凝土中传播时衰减很大, 并随着频率增加呈指数衰减^[8-9], 期间还存在着一定的频散, 所以超声频率一般选在 (50 ~ 500) kHz 范围内。本文采用了 50 kHz 的窄带调制信号, 这种低频信号绕射大、衰减小、穿透力强, 而且带宽很窄, 对混凝土的频散作用表现不明显。但是, 信号频率低、波包时间宽度大, 在进行 SAFT 处理时波包会被拉伸, 造成波包变形, 影响 SAFT 聚焦效果。为此, 引入波包分解技术 (WDT), 为检测信号建立一个数学模型, 使用一些参数去描述信号, 以避免对信号所有采样点进行聚焦处理。这种波包分解的思想是根据 Mallat 提出的匹配追踪法演变而来, 它是通过正交匹配算法, 在波形库内追踪信号的匹配波形, 然后对检测信号进行分解^[10]; 石立华等人对这种方法进行了简化, 按照这种思想提出了一种小波建模法, 在使用电时域反射法对结构进行损伤反射定位仿真上取得了良好的效果^[11], 后又在混凝土材料介电常数的时域测量中应用, 可以较好地地区分时域反射波形中的反射信号, 从而提取出介电常数随频率的变化规律^[12]; 在同一时期内, Demirli 和 Saniie 等人也提出了一种相似的建模方法, 用来判别超声反射回波, 从理论和实验上验证了这种建模方法的有效性^[13-14]。本文对这种改进的方法进行了数值仿真, 采用专业超声仿真软件 WAVE3000 完成, 首先在设计的混凝土模型上进行 B 扫描检测, 然后按照这种算法对检测数据进行处理, 验证它的有效性。

另外, 在实验中, 市场上购得的超声传感器会给探测信号带来余振问题, 常常造成反射声信号被淹没。这是由传感器频响特性造成, 所以对传感器系统

必须进行补偿滤波, 矫正检测信号。本文采用一种数字滤波的传感器补偿方法, 通过在均匀的水介质中采集输入输出信号对所使用的传感器系统进行建模, 然后在系统中加入其逆系统, 实现对传感器的补偿, 可以恢复被余振淹没的反射声信号。

通过混凝土实验对上述两种方法的实际使用效果进行了验证。首先对混凝土试块进行一次 B 扫描, 然后将扫描检测信号进行数字补偿滤波, 抑制传感器给检测信号带来的余振, 最后按照改进的方法完成聚焦处理, 实现试块断面的二维成像。

1 成像原理

图 1 是一个 B 扫描成像系统示意图, 超声传感器在混凝土表面沿着线性孔径移动, 采取“采样-扫描-采样”的工作方式对混凝土进行扫描, 记录每个孔径位置上采集的检测数据, 然后将数据输入电脑进一步对数据进行处理, 并实现混凝土断面二维成像。要对 WDT 算法的优点有更好的理解, 先对 SAFT 成像原理及波包变形产生原因简单说明一下。

1.1 SAFT 成像原理

SAFT 实际上是用一系列单个小孔径传感器去模仿一个大孔径传感器, 从而实现结构内反射点聚焦的过程。由于超声传感器扩散角的存在, 结构内每

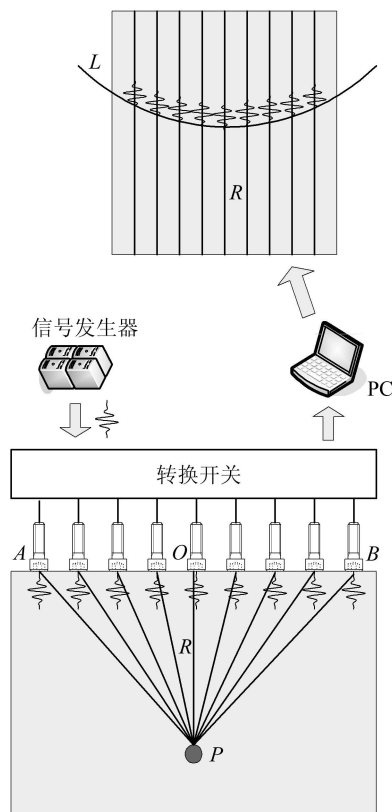


图 1 B 扫描成像系统示意图

个反射点都可能被多个不同孔径位置的传感器探测到。图 1 中, 对于结构内任意一个反射点 $P(x_i, y_j)$, 到扫描线的垂直距离为 $R = y_j$, 当换能器在位置 A 时, 点 P 开始进入照射区域, 当到达位置 O 时, 点 P 到换能器的距离最近, 而换能器移至位置 B 时, 点 P 基本脱离照射区域, 换能器在 A 和 B 之外时, 照射不到点 P, 所以点 P 可望通过 A-B 间检测到的 M 个孔径检测信号重建。由于各孔径位置到点 P 的距离 r_m 是变化的, 可以用式 (1) 来表示:

$$r_m = \sqrt{R^2 + d_m^2}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中 R 是固定值, d_m 为各孔径到点 P 的横向距离, r_m 随着 d_m 的不同呈曲线变化, 如图 1 中曲线 L, 所以点 P 在各个孔径检测信号中反射回波到达时刻 t_m 不同, 可表示如下式:

$$t_m = 2r_m/V, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中 V 为声波在混凝土中的传播速度。SAFT 实际上就是把各个孔径上点 P 的反射回波按距离修正并叠加求平均, 使点 P 突显出来达到聚焦, 对于共有 M 个孔径的检测信号, 可以用式 (3) 表示点 P 的重建过程:

$$S(x_i, y_i) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M F(d_m, t_m), \quad (3)$$

式中 $F(d_m, t_m)$ 表示第 m 个孔径信号中点 P 的回波, $S(x_i, y_i)$ 就是点 P 的重建信号。上述原理说明, 只有在声程上满足合成孔径要求的目标反射才能被聚焦而得到加强。而对于结构噪声和其它一些随机反射干扰信号, 由于不是按照上述反射规律反射, 不满足合成孔径的聚焦条件, 所以, 在进行 SAFT 处理时, 就会被大大减弱。因此, 经过合成孔径处理后, 有用反射信号将会得到增强, 干扰信号则会被抑制。

1.2 波包变形分析

在均匀介质中, 路径引起的声能量衰减以及声程差异, 使得反射纵波幅值和到达时间改变而波形变化不大, 所以在对检测信号进行处理时, 一般以输入波包为单位进行处理^[10-11]。而在 SAFT 运算处理中, 都是以采样点为运算单位, 这样就会造成波包在聚焦过程中产生拉伸, 下面就说明一下波包变形的原因。

在实验中, 采用了如下形式输入信号:

$$h(t) = \cos(2\pi ft) \cdot e^{-(t-t_p) \cdot w^2} \quad (4)$$

它是一个高斯函数调制的余弦波, f 为信号的主频, w 是高斯波的脉宽系数, t_p 是波形发射周期中波包

的位置参数。将同一个反射点的三个孔径数据显示在一起, 如图 2 所示, 孔径间距为 d , L_0 为中心孔径数据, L_A 、 L_B 为左右两侧相邻孔径数据。因为 L_A 和 L_B 情况相同, 就以 L_A 为例进行波包变形的分析。如果反射点距离扫描线为 R , 在 L_0 中反射波包就出现在距离输入信号为 R 处, 同理在 L_A 中应该出现在距离为 $r_1 = \sqrt{d^2 + R^2}$ 处, 且波包宽度相同, 都为 w , 按照 SAFT 算法, L_0 不变, 对 L_A 进行逐点时延调整, 波包始端将被调整到距离为 R 的位置, 与 L_0 中波包始端对齐, 而波包末端将被调整到距离为 R_A 处, 可按式计算得到:

$$R_A = \sqrt{r_1^2 - d^2}, \quad (5)$$

式中 $r_2 = w + r_1$, 波包经过这样调整后, 波包宽度变为 w' :

$$w' = R_A - R > w, \quad (6)$$

相当于把原波包进行拉伸得 L'_A , 在与 L_0 合成聚焦时, 波包除了始端对齐外, 其它点都会错位, 如图 3 所示, 这样就会使得信号聚焦不准确, 图像变得模糊, 而且孔径偏离中心越远, 检测信号波包被拉伸越严重, 变形也就越大。为此, 引入 WDT 对 SAFT 进行改进, 可望解决波包变形问题。

1.3 WDT 原理

采用 WDT 分析检测信号的基本思想是采用输入波包作为描述检测信号的基本单元, 不同位置和尺度上输入波包的组合构成一种对检测信号的逼近^[10]。如果把输入信号当作母波包, 则被测信号可看作是由不同时延、尺度、大小的基波包的组合,

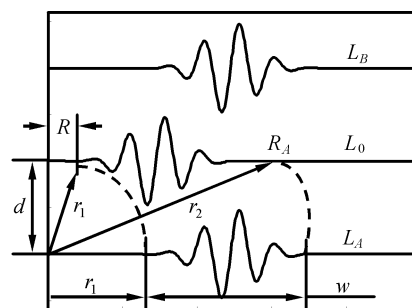


图 2 SAFT 运算示意图

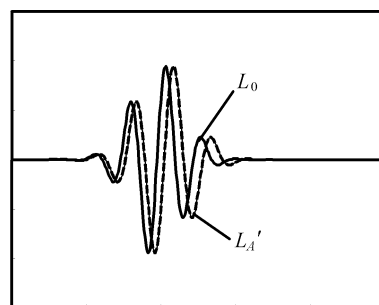


图 3 波包变形示意图

用这样一个逼近模型来表示检测信号有两个优点:

(1) 可以用模型成分解释检测信号的结构; (2) 模型参数数量远小于测量波形的采样点数目。根据这个思想, 用 N 个基波包 $h_i(t)$ 的线性组合去逼近检测信号 $x(t)$, 如下式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N a_i h_i(t) + e(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中 $e(t)$ 是剩余误差, a_i 是表示相应基波包幅值系数, 基波包分解个数 N 可根据实际对信号逼近程度的需要确定, 一般仅通过有限个基波包就可以实现对信号特征的概括。因为这个建模过程就像把信号分解成几个不同的基波包 $h_i(t)$, 所以被称为波包分解技术。波包分解后各单元分别相当于经过不同途径传播到达波包的组合。对于不同时刻到达的波包, 当前后衔接或者说有重叠时, 利用模型分解的方法可望将其分开。

模型参数的估计是通过时域相关计算的方法得出来的。分解前设定 $e_0(t) = x(t)$, 那么 $e_i(t)$ 为第 i 次分解后的剩余误差, 可由式 (8) 得到:

$$e_i(t) = e_{i-1}(t) - a_i h_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

其中 $h_i(t) = h(t - \tau_i)$, 用 $h(t)$ 与 $e_i(t)$ 进行相关计算, 按照相关值的大小顺序逐步分解, 参数 τ_i 和 a_i 按式 (9)、式 (10) 计算得到:

$$\tau_i = \left\{ \tau \mid |\langle e_i(t), h(t - \tau) \rangle| = \max_{\tau} |\langle e_i(t), h(t - \tau) \rangle| \right\}, \quad (9)$$

$$a_i = \frac{|\langle e_i(t), h(t - \tau_i) \rangle|}{|\langle h(t - \tau_i), h(t - \tau_i) \rangle|}. \quad (10)$$

采用 $h(t)$ 作为输入超声信号, 那么被测波形中的波包成分将是输入信号与结构作用后的信号, 很大程度上保留了输入信号特征。图 4(a) 是一个检测信号的波包分解示意图。 $x(t)$ 是原始检测信号, 按照幅值大小顺序被分解成 5 个基波包, 记作 $h_1(t) \sim h_5(t)$ 。每个基波包除幅度 a_i 、到达时间 τ_i 不同外, 基本形状与输入母波包 $h(t)$ 相似, 可以近似表示如下:

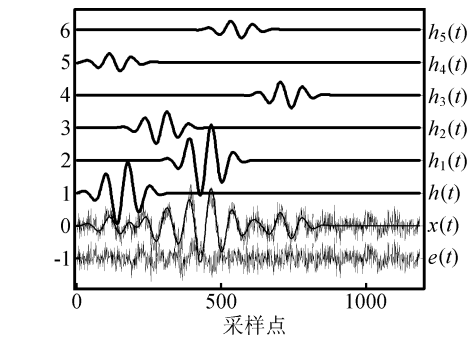
$$h_i(t) = h(t - \tau_i) = \cos(2\pi f(t - \tau_i)) e^{-((t - t_p - \tau_i)\omega)^2}, \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (11)$$

式 (7) 中的剩余误差 $e(t)$ 是由一些干扰噪声组成, 从图中可以看出 $e(t)$ 相对分解波包来说是很小的, 也就是说被分解出的波包能大体反映出原检测信号特征, 如式 (12), 可近似用 $x'(t)$ 表示:

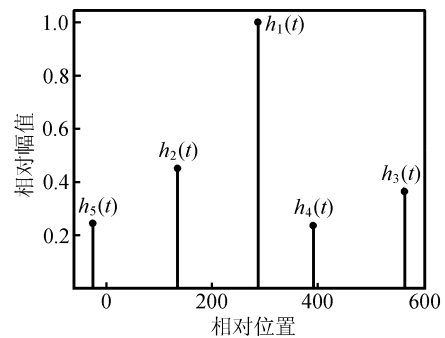
$$x'(t) = \sum_{i=1}^5 a_i h_i(t) \approx x(t). \quad (12)$$

图 4(b) 给出了基波包在时间和幅度上的分布图, 可以清晰显示出每个基波包的到达时刻及其幅值。

检测信号在进行 SAFT 处理前, 先进行 WDT 处理, 计算出每个信号的分解模型。然后根据 SAFT 算法对波包到达时间 τ_i 进行时延调整, 这样处理相当于整个信号仅需要对有限个时间参数进行调整即可, 避免对所有采样点进行处理。这样不仅使得在通过时延调整后, 不同检测信号中来自同一个反射点的反射波包到达时间一致, 改善聚焦效果, 而且可以大大简化 SAFT 运算。此外, 还可以将剩余误差 $e(t)$ 省去, 去除信号中大部分干扰噪声, 可以改善图像信噪比。



(a) 波包分解结果

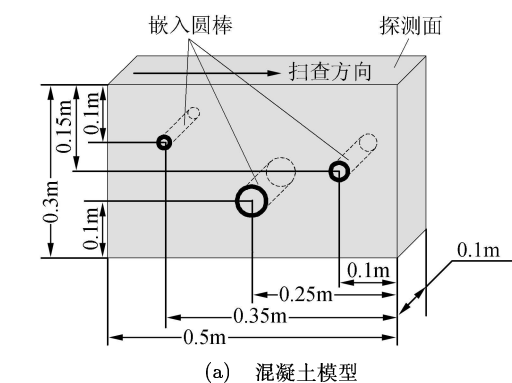


(b) 基波包分布图

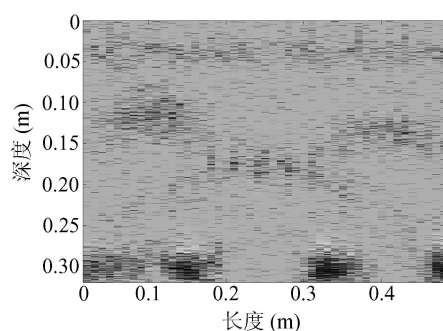
图 4 波包分解原理示意图

2 数值仿真

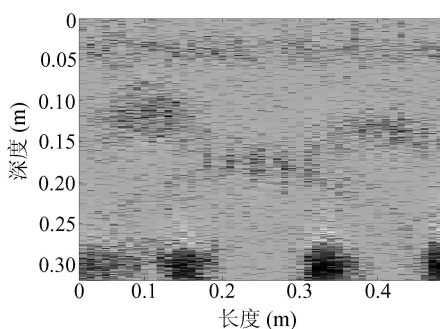
数值仿真采用超声专业仿真软件 WAVE3000 完成, 以检验上述成像算法的实际处理效果。仿真中所设计混凝土结构模型为 $(0.5 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m})$ 的长方体, 在模型中还放置了三根圆棒, 直径分别为 20 mm, 50 mm, 30 mm, 它们在模型中的位置如图 5(a) 所示, 在模型探测面进行一次 B 扫描检测, 所用传感器直径为 20 mm, 每次移动步长为 10 mm, 选用 $h(t)$ 作为输入激励信号, 频率为 50 kHz, 并设定超声传播速度为 4000 m/s, 模型四个侧面都定为无限边界, 可以避免产生边界干扰。



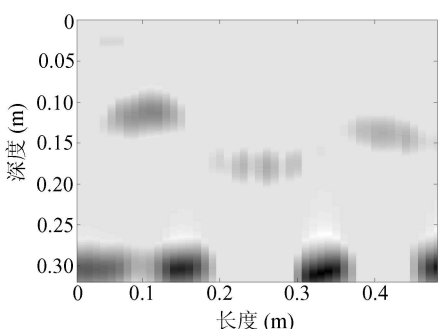
(a) 混凝土模型



(b) B 扫描成像图



(c) SAFT 成像图



(d) 引入 WDT 后的 SAFT 成像图

图 5 混凝土模型仿真

B 扫描检测信号直接成像如图 5(b) 所示, 是由每个孔径位置所采集的检测信号直接顺序堆积在一起得到, 图中横坐标为与扫查方向一致的长度坐标, 纵坐标则表示超声传播对应的声程, 也就是模型的深度坐标(在后面的成像图中坐标也都是这样定义, 就不重复说明)。图 5(b) 中除了底边明显可见外, 目

标反射曲线基本被噪声淹没, 模糊难辨。在对 B 扫描检测信号直接进行 SAFT 处理, 按照公式 (3) 对信号进行重建后, 成像如图 5(c) 所示, 从中可以看出在强噪声背景下, 由于波包变形的原因, 聚焦效果很差, 导致目标反射信号也不够突出, 依旧被淹没在噪声中, 成像结果与图 5(b) 相近。为了改善这种成像效果, 在对 B 扫描检测信号进行 SAFT 处理以前, 先完成 WDT 处理, 分别对每个孔径检测信号建立如式 (12) 的逼近模型, 然后对所有模型进行 SAFT 处理, 成像结果如图 5(d) 所示, 由于剩余误差被省略, 使得信噪比大大增加, 图像更加清晰, 且聚焦效果更明显, 突出了反射信号, 内嵌目标已经被显示出来, 成像分辨率得到了提高。从图 5(d) 还可以明显看出三个目标反射信号随着声程的增加, 强度逐渐变弱, 但是由于它们都是弧面反射, 很多反射信号被折射到其它方向去了, 使得反射信号强度比底面的镜面反射信号小很多, 在每个目标下方的底面都存在一个缺口, 是因为超声波被目标挡住了, 不能传播到底面, 也就没有底面反射, 这在前面两幅图中也可以大致看出来, 都是符合实际情况的。所以, 此次仿真效果非常接近实际情况, 可以看出引入 WDT 方法前后成像结果有着明显的差别, 引入 WDT 对提高成像分辨率非常有效。

3 实验研究

上述数值仿真实验对所提出的方法进行了一定的验证, 但是毕竟还是有其局限性, 不可能完全代替实际的实验过程和结果。为此又对一个混凝土试块进行了一次实际探测实验, 用来进一步验证这个方法的有效性。

3.1 实验系统

按照图 1 建立探测实验系统, 并按照实际建筑配比设计浇筑了一块混凝土试块, 体积为 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$, 试块右半部分的中央位置放入一根直径 50 mm 钢管, 作为嵌入在结构中的探测目标, 如图 6 所示; 仍然采用 $h(t)$ 作为输入检测信号, 频率为 50 kHz; 实验中使用的超声传感器是 KCRT 公司生产的两个 50 kHz 传感器, 直径都是 40 mm, 一个发射一个接收对试块进行 B 扫描。在探测过程中

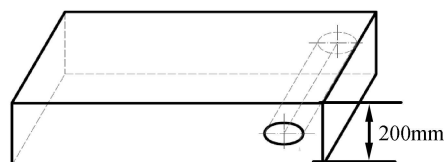


图 6 混凝土试块结构

发现, 传感器在谐振频率工作时, 探测信号会出现余振, 时常将反射信号淹没。所以为了能从检测信号中提取有用信息, 首先对传感器进行了补偿滤波, 消除检测信号中的余振。

3.2 传感器频响补偿

一般商用低频超声传感器为了获得低的频率, 通常采用夹心式结构, 这种结构将会导致传感器声匹配不足, 使得声波不能被快速吸收, 致使振铃产生^[15-16]。通过数字滤波处理方法可以对其进行补偿, 其补偿原理如图 7 所示。假定 $H(z)$ 为存在非理想响应特性的测量系统, 首先是由系统的输入 $x(n)$ 、输出 $y(n)$ 求解系统的离散转移函数模型 $H(z)$, 而后再推算出其逆系统 $H_0(z)$, 加入到探测系统中对信号进行滤波, 以补偿传感器的不良频率响应^[17-18]。

按照上述补偿原理, 对超声传感器进行系统建模和补偿。实验采用水浸方式采集系统输入和输出数据, 因为水是一种均匀的、各向同性介质, 许多超声检测试验也是采用水浸方式完成的^[19-20], 而且这种介质也很容易获得。实验采集的输入与输出信号如图 8 所示, 可以看出余振相当明显, 将波包延伸了约一倍时间宽度。然后按照系统辨识算法对传感器系统进行建模, 得到它的转移函数 $H(z) = B(z)/A(z)$, 并求出其逆系统 $H_0(z) = A(z)/B(z)$ 加入到探测系统中进行补偿滤波, 这一过程可在 Matlab 中系统辨识工具箱函数中实现。

在系统中加入 $H_0(z)$ 后, 可从图 9 中看出, 补偿后的信号 $x'(n)$ 与原信号 $x(n)$ 非常接近, $x(n)$ 主体部分得到了恢复。由于存在模型估计误差, 有一些额外杂波产生, 但在实际应用中证明并没有产生很大影响。

3.3 声速测量

在对混凝土试块进行成像前, 需测量出超声在其中的传播速度。实验中, 声速测量在试块中未嵌入目标的左半部分完成。在工程检测中, 用对测法测量的声速比较接近实际声速, 所以首先用对测法进行了声速测量, 通过将两个传感器相对放置于检测面和底面上, 对齐中心轴进行多个位置测量, 测得平均声速约为 4255.3 m/s。但是, 由于大多混凝土结构都只有一个面可供检测, 所以按照单面平测法也进行了声速测量, 并与对测法的测量结果进行了比较。

平测法如图 10 所示, 用甘油作为耦合剂将发射传感器耦合固定在试块检测面上, 然后先将接收传感器置于与发射传感器 50 mm 的距离处 (是指两传感器中心间的距离, 是根据传感器的外径大小确定的),

再以 20 mm 的步长移动接收传感器, 进行了 6 个位置的定点探测, 在每个位置上记录波形。然后将采集的波形分别通过补偿滤波系统, 由于篇幅限制, 这里任取了一组补偿前后的检测信号进行比较, 如图 11 所示, 可以看出原来混叠在表面直达波余振中的目标反射波已经“显露”出来, 很容易被识别。

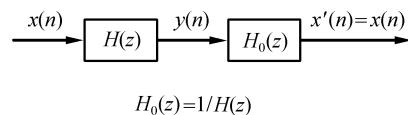


图 7 传感器补偿原理

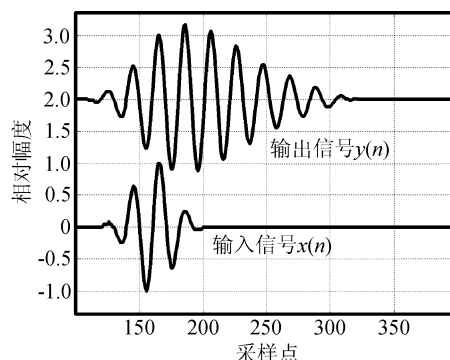


图 8 输入与输出信号比较

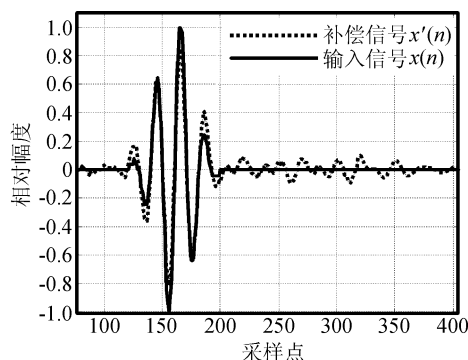


图 9 输入信号与补偿信号比较

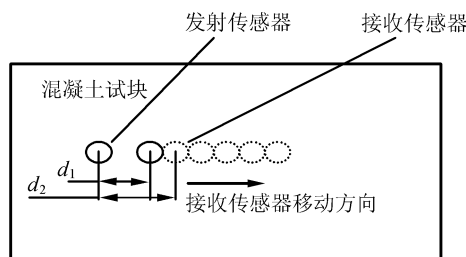


图 10 平测法测量声速示意图

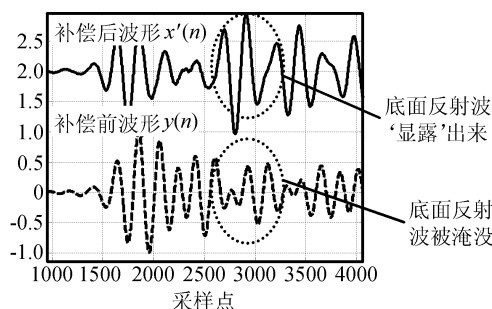


图 11 补偿前后波形对照

使用 WDT 提取出底面反射波, 按照其出现位置分别计算出超声传播时间 t_i , 然后根据式 (13) 计算出各个距离点间的声速和平均声速列于表 1 中。

$$v = \sqrt{(d_{i+1}^2 - d_i^2)/(t_{i+1}^2 - t_i^2)}, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (13)$$

式中 d_{i+1} 和 d_i 分别为两次采样时传感器的中心距, t_{i+1} 和 t_i 分别为对应位置测量的超声传播时间。从表 1 中计算结果可以看出测量效果比较满意, 平测法测量的声速与对测法测量的声速相当接近。

表 1 相邻测点声速计算结果

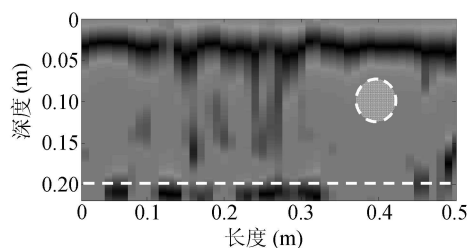
传感器中心距 (mm)	声速 (m/s)
50	—
70	4170.7
90	4012.1
110	4072.3
130	4259.6
150	4254.0
平均	4166.7

3.4 成像结果

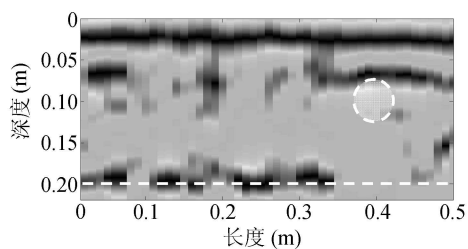
测量出平均声速后, 可以对混凝土试块完成扫描成像实验。按照 B 扫描方式沿试块探测面进行扫描, 并将检测信号进行数字补偿滤波, 图 12 就是检测信号在数字补偿滤波前后的成像图, 图中白色圆形虚线区域标明试块中嵌入圆管的所在位置, 下面白色虚直线表示底面位置, 这样便于对照说明。比较两幅成像图, 可以看出在没有进行数字滤波前, 圆管反射波都被表面直达波余振淹没, 所以在圆管所在位置找不到其反射回波; 而在信号进行数字补偿滤波后, 余振被消除, 反射波显露出来, 可清晰看到圆管反射回波, 在图中可显示出圆管的位置。但是补偿数据成像仍然属于 B 扫描数据直接成像, 从图中可以看出, 其信噪比低、分辨率差, 还存在多种干扰信号, 还需要进行进一步聚焦处理。

图 13 是将补偿数据进行聚焦处理的结果, 其中图 13(a) 为直接用 SAFT 处理所得的成像图, 图 13(b) 则为用改进方法处理所得的成像图。从图 13(a) 可以看出, 由于聚焦时存在波包变形, 聚焦效果差, 反射信号还是不够突出, 再加上表面波能量高, 使得目标和底面反射信号都显得很淡; 在加入了 WDT 后, 首先可以消除表面直达波影响, 因为表面直达波传播距离最短, 衰减最小, 在信号中幅值一般也是最大的, 可以从图 12 和 13(a) 中看出, 所以, 用 WDT 方法将分解出的波包中最大波包减去即可消除表面直达波, 如图 13(b) 所示; 接着再将分解后的信号完

成 SAFT 处理并成像, 得到图 13(b)。比较图 13 中两幅图, 可以看出在加入 WDT 后, 不仅将表面波消除, 而且目标和底面反射信号更加突出, 聚焦效果更明显, 由于小幅噪声被省去, 图像也更加清晰。但是目标和底面位置有些靠上, 这是由于所用的平均声速偏小所造成的。在图像中两侧出现的黑条是来自侧面反射干扰, 可以通过控制传感器与侧面保持一定距离来尽量避免。

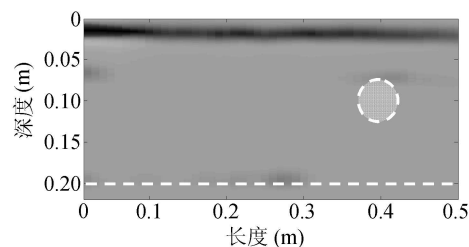


(a) B 扫描成像图

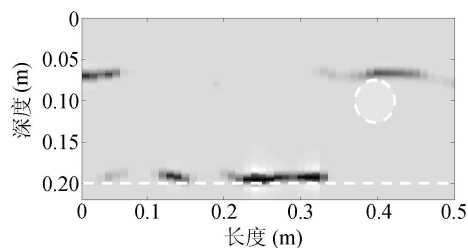


(b) 经过补偿滤波后成像图

图 12 B 扫描数据补偿滤波前后比较



(a) SAFT 成像图



(b) 引入 WDT 后 SAFT 成像图

图 13 引入 WDT 前后 SAFT 成像图

4 结论

本文针对在混凝土超声成像中影响分辨率的两个实际问题, 分别提出了相应解决方法。在 SAFT 聚焦过程中, 通过对低频检测信号进行 WDT 处理,

解决了波包变形问题, 不仅可以提高图像分辨率, 而且成像运算也大大简化, 数值仿真结果验证了这些效果。而对于低频传感器出现的余振问题, 采用数字补偿滤波方法去解决, 取得了很好的效果, 提高了图像的时空分辨率。混凝土试块的成像实验证明, 这两种方法应用效果良好, 不仅可以比较准确的测量出混凝土中超声传播速度, 而且目标定位更突出、更准确, 可以获得更加清晰的成像结果。这类信号处理方法对于声学工程中目标的高分辨成像和准确定位方面有一定的应用价值, 在其他基于反射定位的无损检测中, 对于检测分辨率的提高也很有借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 牟永光. 地震勘探资料数字处理方法. 北京: 石油工业出版社, 1981
- 2 孙宝申, 张 凡, 沈建中. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究. 声学学报, 1997; **22**(1): 42—49
- 3 刘纪元, 唐劲松, 孙宝申等. 合成孔径声呐成像自聚焦方法研究. 声学学报, 2003; **28**(2): 151—154
- 4 Schickert M. Ultrasonic NDE of concrete. Proc. of 2002 IEEE Ultrasonics Symposium, München, 2002, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2002: 718—727
- 5 Schmitz V, Chakhlov S, Müller W. Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field. *Ultrasonics*, 2000; **38**(8): 739—744
- 6 Kroggel O, Schnapp J, Schickert M. Statistical evaluation of ultrasound images of concrete structures. British Institute of Non-Destructive Testing, 2002; **45**(12): 853—859
- 7 Kazys R, Svilainis L. Analysis of adaptive imaging algorithms for ultrasonic non-destructive testing. *Ultrasonics*, 1995; **33**(1): 19—30
- 8 Chaix J F, Garnier V, Corneloup G. Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: theoretical analysis and experimental validation. *Ultrasonics*, 2006; **44**(2): 200—210
- 9 Delsanto P P, Hirsekorn S. A unified treatment of non-classical nonlinear effects in the propagation of ultrasound in heterogeneous media. *Ultrasonics*, 2004; **42**(1): 1005—1010
- 10 Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993; **SP-41**: 3397—3415
- 11 Shi L H, Chen B, Gao C. Design and modeling of signals by using wavelets for the pulse-echo NDT approaches. Proc. of 2001 SPIE - The International Society for Optical Engineering, Newport Beach, CA, 2001, Washington: SPIE, 2001: 146—153
- 12 石立华, 徐其威, 高 成等. 小波建模法在混凝土材料介电常数时域测量中的应用研究. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002; **3**(6): 35—38
- 13 Demirli R, Saniie J. Model-based estimation of ultrasonic echoes part I: analysis and algorithms. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001; **48**(3): 787—802
- 14 Demirli R, Saniie J. Model-based estimation of ultrasonic echoes part II: nondestructive evaluation applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001; **48**(3): 803—811
- 15 林书玉, 桑永杰, 田 华. 径向复合压电陶瓷超声换能器的径向振动特性研究. 声学学报, 2007; **32**(4): 310—315
- 16 高天赋, 曾 娟, 彭大勇. 压电陶瓷换能器宽带匹配特性分析. 声学学报, 2007; **32**(2): 97—102
- 17 孙海波, 孔德仁, 何 瑛. 传感器动态误差修正方法探讨. 南京理工大学学报, 2000; **24**(4): 330—333
- 18 Ljung L. System Identification: theory for the user. 2nd. NJ: Prentice-Hall, 1999
- 19 Yoshikazu Ohara, Koichiro Kawashima. Detection of internal micro defects by nonlinear resonant ultrasonic method using water immersion. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004; **43**(5): 3119—3120
- 20 Hak-joon Kim¹, Sung-Jin Song, Schmerr L W. Modeling ultrasonic pulse-echo signals from a flat-bottom hole in immersion testing using a multi-Gaussian beam. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2004; **23**(1): 11—19