

基于统计特征均方根的层状混凝土结构脱层缺陷超声成像

刘丁嘉¹⁾ 张辉^{1†)} 张海燕^{2†)} 苗中华³⁾ 肖爱武^{4†)}

1) (上海工程技术大学, 城市轨道交通学院, 上海 201620)

2) (上海大学, 通信与信息工程学院, 上海 200444)

3) (上海大学, 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

4) (国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233)

摘要

层状混凝土结构因功能分区明确和施工便捷等优势被广泛应用于基础设施中。然而, 此类结构在服役过程中常因复杂环境的影响, 产生脱层缺陷, 严重影响结构安全。本文针对脱层缺陷检测中存在的定位不准确和成像质量差等问题, 提出一种基于统计特征均方根(statistical-feature root-mean-square, SRMS)的超声成像方法。该方法首先采用均方根声速模型计算出声波在层状结构中传播的等效声速, 从而提高缺陷定位精度。然后, 利用缺陷区域信号强度高和稳定性好的特点, 构建信号均值标准差因子, 从而提高成像质量。最后, 通过无砟轨道脱层缺陷仿真与实验验证了该方法的准确性, 研究表明: SRMS 方法在脱层缺陷的长度、定位精度、纵向主瓣展宽压缩能力上, 较 DAS 方法均有较大提升。在成像质量方面, SRMS 方法的 CR、CNR、pSNR 较 DAS 方法分别提升 29%、18%、164%。因此, 本文提出的 SRMS 方法不仅提高了层状混凝土结构中脱层缺陷的检测精度, 还显著提升了成像质量。

关键词: 超声检测, SRMS, 层状结构, 脱层缺陷

PACS: 43.20.Fn, 43.35.Zc

国家自然科学基金(批准号: 12474457, 12374443)

† 通信作者.E-mail: huizhang@sues.edu.cn

† 通信作者.E-mail: hyzh@shu.edu.cn

† 通信作者.E-mail: xiaoaw@snpssc.com

第一作者.E-mail: m405123211@sues.edu.cn

1 引言

混凝土凭借其稳定性^[1]、耐久性^[2]和可塑性^[3]，在工程中得到广泛应用。其中，层状混凝土结构因其功能分区明确^[4]、施工便捷^[5]等优势被广泛应用于桥梁、隧道、轨道等关键基础设施中^[6]。然而，此类结构在服役过程中常因外部载荷和复杂环境的影响，产生脱层缺陷，严重影响结构安全性与耐久性^[7]。无砟轨道是由轨道板、砂浆层、支承层组成的典型层状混凝土结构，作为铁路的关键基础结构，由于长期受到列车冲击^[8]和恶劣环境^[9]等因素影响，容易产生脱层缺陷^[10]。脱层缺陷的产生破坏了无砟轨道结构的承载力和完整性，进而影响钢轨的平顺性，严重威胁行车安全。因此，实现无砟轨道脱层缺陷的精确检测是高铁运维的迫切需求，对保障列车安全运行至关重要^[11]。

常用的无损检测方法有冲击回波法^[12]、X射线法^[13]、微波检测^[14]、超声波检测^[15]等。其中超声波检测凭借检测精度高^[16]、穿透能力强、指向性明确^[17]等优势，被广泛应用于混凝土结构检测^[18]。常规的超声检测分析方法，如时频分析^[19]、小波变换分析^[20]和飞行时间分析^[21]，能够对混凝土结构中孔洞、裂缝等缺陷进行检测。然而传统的超声检测方法是基于恒定声速进行检测，而无砟轨道是由轨道板、砂浆层、支承层组成的层状混凝土结构，由于层间的用料配比、密度等物理性质的差异，声波在各层间传播速度不同，无法获取声波在该结构中准确的传播时间，进而影响脱层缺陷的精确检测。

针对层状结构的缺陷检测，国内外学者进行了探索研究。Zhang 等^[22]采用基于射线追踪的方法以精确计算声波在层状结构中的传播路径与传播时间，然而其迭代过程复杂，成像效率低。Cruza^[23]将虚拟源方法引入层状复杂结构的超声波成像中来提升成像效率，然而该方法受到检测时噪声和界面不规则等因素的影响，成像质量差。Skjelvareid^[24]受地震勘探中平面波理论启发，将相位偏移算法

应用于层状结构的合成孔径超声成像中，提高了层状结构的成像分辨率与对比度。Jim 等^[25]在此基础上，拓展了相位偏移算法的应用场景，同时提高了层状结构成像的精度与质量。然而，以上方法涉及大量的频域变换和复杂数值运算，且对硬件设备性能要求高，限制了其在工程领域的广泛应用。

近年来，自适应加权成像技术因其在提升图像质量方面的显著优势受到广泛关注。相干系数 (Coherence Factor, CF) 通过衡量相干能量与总能量之比，有效提升横向分辨率与对比度，但存在图像亮度低、背景噪声抑制不足等问题^[26]。为此 Li 等^[27]提出广义相干系数 (GCF)，增强对声速不均的鲁棒性，有效抑制旁瓣。Camacho 等^[28]基于信号相位与符号特性提出 PCF 与 SCF，进一步提升分辨率与信噪比；Wang 等^[29]提出的信号均值标准差系数 (SMSF) 利用通道信号的均值与标准差比值构建加权因子，在合成孔径成像中展现出计算简便、成像质量高等优点。

针对层状混凝土结构脱层缺陷超声检测定位精度低，成像质量差等问题，本文提出了一种基于统计特征均方根 (statistical-feature root-mean-square, SRMS) 自适应超声成像方法。该方法采用均方根^[30]速度模型替代传统方法中的固定声速，通过各层的声速与厚度计算出等效声速，并将其统一应用于所有目标点的时延修正，间接修正斯奈尔定律^[31]带来的路径偏差，克服传统延迟叠加 (delay and sum, DAS) 方法的聚焦偏差，提高脱层缺陷定位精度。同时利用缺陷区域信号强度高、稳定性好的特点，将幅度均值与标准差相比，构建信号均值标准差因子。该因子通过量化局部信号的强度与稳定性，在缺陷区域赋予较高的权重，非缺陷区域赋予较低的权重，进而增强脱层缺陷的回波信号，抑制噪声与伪像，提高成像质量。与传统的超声成像方法相比，SRMS 方法提高了检测精度和成像质量，减少了计算复杂度，为层状混凝土结构脱层缺陷的高精度检测提供了新的方法。

2 成像方法

2.1 DAS成像方法

延迟叠加是超声成像中一种应用广泛的波束形成方法^[32]。如图 1(a)所示，其核心原理在于补偿因声程差异而导致的各阵元接收回波的传播时延。该算法对每个阵元接收到的信号引入相应的延时补偿，使来自同一目标散射点的信号在时间上对齐。随后，将补偿后的信号进行相干叠加。由于目标信号在各阵元间具有相关性，叠加后其幅度得到增强，而噪声信号通常表现为非相关性，在叠加过程中发生干涉相消而被抑制。以模型左上角为原点，长度方向为 x 轴，厚度方向为 z 轴，建立如图 1 所示的坐标系。该过程的数学表达式为^[33]：

$$I_{DAS}(x, z) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{ij}(x, z)) \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + z^2}}{c} \quad (2)$$

式(1)中， I_{DAS} 为点 (x, z) 的像素值， s_{ij} 表示为阵元 i 发射，阵元 j 接收到的回波数据， N 为阵元数量。式(2)中 τ_{ij} 为声波在阵元 i 与阵元 j 之间的传播时间， $(x, 0)$ 和 $(x_j, 0)$ 分别为阵元 i 与阵元 j 的坐标， c 为声速。

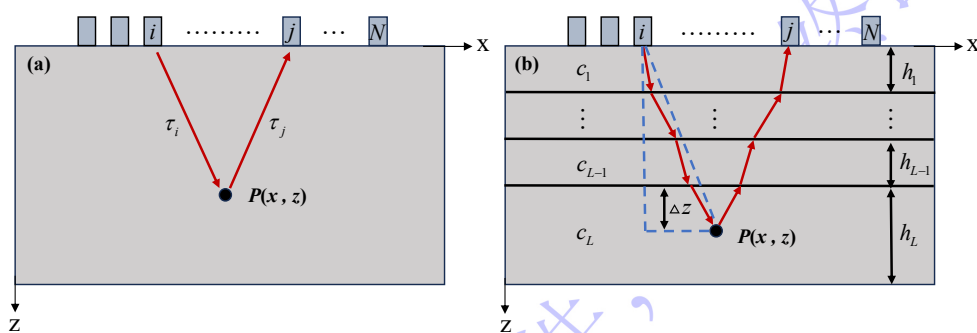


图 1 声波传播路径图：(a) 声波在单层结构中传播；(b) 声波在多层结构中传播

Fig 1 Diagram of the acoustic wave propagation path: (a) Sound wave propagation in a single-layer structure; (b) Sound wave propagation in a multi-layer structure

1.2 RMS 成像方法

在 DAS 算法中，用于计算传播时间的声速 c 始终为一个固定值，并不适用

于多层结构。在多层结构中，由于层间声速存在差异，声波在散射体与传感器之间的传播时间无法精确计算。针对这一问题，采用均方根(root-mean-square, RMS)速度模型来计算多层结构中超声传播的时间，通过将各层介质的声速和厚度加权平均，获得一个等效的声速值，从而更准确地表征声波在多层介质中的整体传播特性，有效提高了时延计算的精度。

在单层结构中，式(2)可以整理为：

$$\tau_{ij}(x, z) = \sqrt{\frac{(x-x_i)^2}{c^2} + \tau_0^2(z)} + \sqrt{\frac{(x-x_j)^2}{c^2} + \tau_0^2(z)} \quad (3)$$

式(3)中， $\tau_0(z) = \frac{z}{c}$ 表示为阵元*i*到散射体 *P* 在单一介质中单向垂直的传播时间。

考虑到多层结构中层间的声速存在差异，如图 1(b)所示，单向垂直的传播时间可以表示为：

$$\tau_0(z) = \left(\sum_{k=1}^{L-1} \frac{h_k}{c_k} \right) + \frac{\Delta z}{c_L} \quad (4)$$

式(4)中， h_k 和 c_k 分别代表第 *k* 层的厚度和速度，而 $\Delta z = z - \sum_{k=1}^{L-1} h_k$ 表示散射体 *P* 到 *L-1*层与 *L*层界面的垂直距离， c_L 为第 *L*层的声速。根据均方根速度的定义，多层结构的均方根速度为^[34]：

$$c_{rms}(z) = \sqrt{\frac{\left(\sum_{k=1}^{L-1} c_k^2 t_k \right) + c_L^2 \left(\tau_0(z) - \sum_{k=1}^{L-1} t_k \right)}{\tau_0(z)}} \quad (5)$$

式(5)中， $t_k = h_k/c_k$ 为第 *k* 层声波单向垂直的传播时间。式(4)及 $h_k = c_k t_k$ 带入式(5)后，将均方根速度公式整理为：

$$c_{rms}(z) = \sqrt{\frac{\left(\sum_{k=1}^{L-1} c_k h_k \right) + c_L \Delta z}{\tau_0(z)}} \quad (6)$$

式(4)中在前 *L-1*层厚度不变的情况下，声波在多层结构中垂直传播所需要的时间 $\tau_0(z)$ 是第 *L*层垂直传播距离 Δz 的单调递增且连续的函数，在有效合成孔径所

限定的空间范围内调节超声探头时，通过泰勒级数展开方法得到声波传播的时间 [35]：

$$\tau_{rms}^2(x, z) = \tau_0^2(z) + a_2(x - x_i)^2 + a_4(x - x_i)^4 + \dots + a_{2n}(x - x_i)^{2n} \quad (7)$$

式(7)中 $a_2 = \frac{1}{c_{rms}^2}$ 是泰勒展开式中的二次项系数，同时根据 Fomel 等 [36] 关于广

义非双曲线走时的研究，当水平偏移量 $\frac{|x - x_i|}{z} \leq 1.5$ 时，走时平方泰勒展开式中的

二次项占据绝对主导地位，由四次项及以上高阶项引起的走时残差微乎其微，因此高阶项 (a_4, a_6, \dots) 可以忽略。最后将式(4)带入忽略高阶项后的式(7)中，得到

RMS 方法在点 $P(x, z)$ 处，阵元 i 发射，阵元 j 接收的声波传播时间为：

$$\tau_{rms-ij}(x, z) = \sqrt{\frac{(x - x_i)^2}{c_{rms}^2(z)} + \tau_0^2(z)} + \sqrt{\frac{(x - x_j)^2}{c_{rms}^2(z)} + \tau_0^2(z)} \quad (8)$$

最后，采用 RMS 方法计算得出声波从传感器激发后传播至结构内部任意位置的传播时间，再与 DAS 方法中的式(1)相结合，进而提高缺陷的检测精度。

1.3 SRMS 成像方法

RMS 方法虽然可以提高多层结构中的成像精度，但在混凝土这类高衰减、多散射介质中，成像精度及成像质量易受旁瓣伪影和随机噪声的干扰，RMS 方法的线性叠加机制对背景噪声及非相干信号的抑制能力仍然不足。而信号均值标准差因子方法利用回波信号的幅度均值量化局部信号强度，利用其标准差反映局部信号稳定性，并构建幅度均值与标准差的比值作为权重因子。该比值有效地量化了局部信号的信噪比特性，在缺陷区域，高均值与低标准差的组合使得比值显著增大，从而赋予该区域较高的权重。而在非缺陷区域，低均值与高标准差的组合使得比值减小，赋予较低的权重。如图 2 所示，将这种基于统计比值构建的权重分配机制与 RMS 方法结合，构建统计特征均方根方法，该方法在抑制噪声干扰的同时，增强了目标缺陷区域信号，最终提高了超声波成像的精度与质量。

SMSF 的数学表达式为:

$$SMSF(x, z) = \frac{E[S(\tau)]}{\sigma[S(\tau)]} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{ij}(x, z))}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{ij}(x, z)) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{ij}(x, z)) \right)^2}} \quad (9)$$

式(9)中, $E[\cdot]$ 为均值运算, $\sigma[\cdot]$ 为标准差运算, $S(\tau)$ 为延迟补偿后 N 个阵元接收到的回波信号。将式(8)带入式(9)可以得到加入 RMS 速度模型后的权重因子:

$$SMSF_{rms}(x, z) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{rms-ij}(x, z))}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{rms-ij}(x, z)) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{rms-ij}(x, z)) \right)^2}} \quad (10)$$

最终得到 SRMS 方法在 $P(x, z)$ 处的像素值 $I_{SRMS}(x, z)$ 为:

$$I_{SRMS}(x, z) = SMSF_{rms}(x, z) \times \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N s_{ij}(\tau_{rms-ij}(x, z)) \quad (11)$$

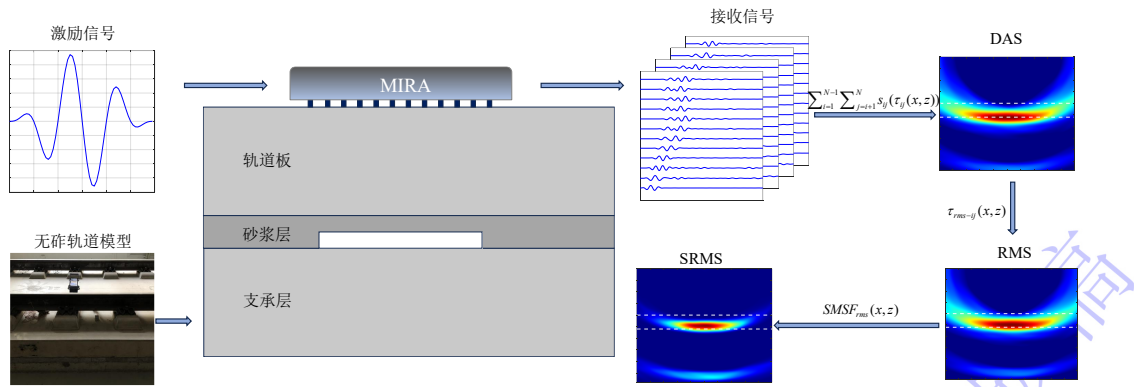


图 2 SRMS 示意图
Fig. 2 Diagram of SRMS

1.4 评价指标

本文采用对比度(contrast ratio,CR)、对比度噪比(contrast-to-noise ratio,CNR)以及峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio,pSNR)对超声成像质量进行评价:

对比度(CR)用于衡量目标区域与背景区域之间的灰度差异,反映了图像中不同组织的区分能力。其数学表达式为:

$$CR = 20 \log_{10} \left(\frac{u_d}{u_b} \right) \quad (12)$$

式(12)中, u_d 和 u_b 分别为缺陷的平均强度和背景的平均强度。

对比度噪比(CNR)则进一步考虑了噪声的影响,通过比较目标与背景的信号

差异相对于背景噪声的大小，更准确地评估图像中目标的可检测性和清晰度。其数学表达式为：

$$CNR = 20 \log_{10} \left(\frac{|u_d - u_b|}{\sigma_b} \right) \quad (13)$$

式(13)中， σ_b 为背景的标准差。

峰值信噪比(pSNR)是通过比较缺陷的最大幅值与背景噪声平均幅值来评估图像质量，常用于量化图像的整体清晰度和细节保留程度。其数学表达式为：

$$pSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{I_{\max}}{u_b} \right) \quad (14)$$

式(14)中， I_{\max} 为缺陷处的最大强度。

以上评价指标综合反映了超声图像的清晰度、目标与背景的分度以及噪声控制水平，为全面评估超声成像算法的性能提供了多维度的量化依据。

2 仿真

2.1 有限元模型

本文利用 COMSOL 有限元软件建立无砟轨道结构二维有限元仿真模型，如图 3 所示。模型大小为 500mm×460mm，有限元模型由轨道板、砂浆层和支承层组成，各层材料的参数详见表 1。模型上边界沿长度方向均匀布置了 12 个传感器，相邻两个传感器的中心间距为 30mm。砂浆层内部布置了一个长度为 300mm，厚度为 30mm 内含空气的脱层缺陷。在声学与固体力学物理场中，空气作为流体介质，其剪切模量为零，因此横波无法在空气介质中传播，其横波速度在物理上为 0 m/s。关于激励与接收的信号，本文在 COMSOL 的固体力学物理场中，通过依次在各阵元施加一个中心频率为 50kHz 的汉宁窗调制的正弦信号，并将其方向设定为水平，即沿 x 方向，从而激发剪切波，最后采集并导出所有阵元的 x 方向位

移用于成像。有限元模型仿真参数如表 2 所示。同时为了减少模型边界反射波的影响，模型的外围边界均设置为吸收边界。

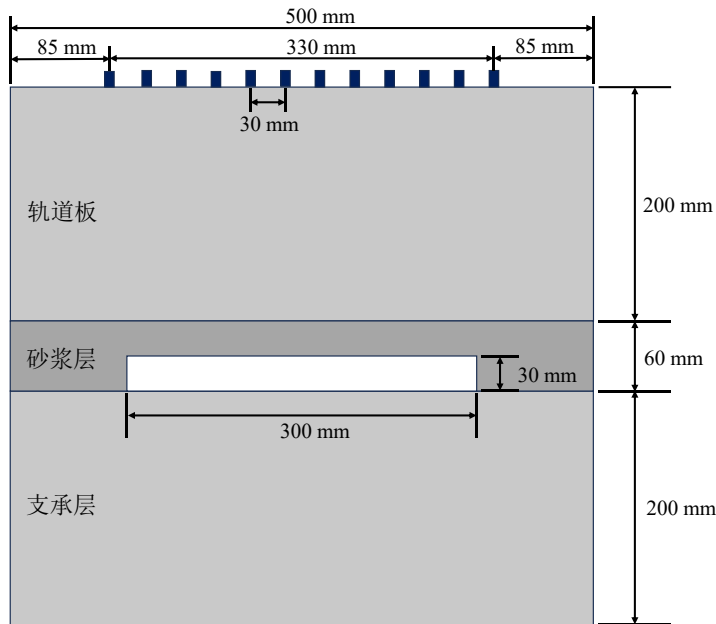


图 3 二维有限元仿真模型

Fig. 3 Two-dimensional finite element simulation model

表 1 无砟轨道各层的材料参数

Table 1 Each layer of ballastless track material parameters

特性	轨道板	砂浆层	支承层	脱空区域
材料密度/(kg/m ³)	2500	1800	2500	1.29
材料杨氏模量/GPa	36	7	36	0
材料泊松比	0.2	0.3	0.2	0
各层长度/mm	500	500	500	300
各层厚度/mm	200	60	200	30
横波速度/(m/s)	2450	1223	2450	0

表 2 有限元仿真配置参数

Table 2 Finite element simulation configuration parameters

特性	特性值
模型尺寸/mm	500×460
相邻传感器的间距/mm	30
传感器数量	12
波型	横波
激励频率/kHz	50
网格大小/mm	1×1

2.2 瞬态声场

利用 COMSOL 建立仿真模型后，使用参数化扫描，使超声阵元依次发射激

励信号，信号在接触到缺陷后产生反射波，随后所有阵元将反射波接收。图 4 为从第 7 个阵元发射信号的瞬态声场分布。其中，图 4(a)为入射波在未到达缺陷时的瞬态声场，图 4(b)显示了入射波穿过界面到达缺陷位置的瞬态声场，图 4(c)显示了缺陷反射波以及透射波的瞬态声场，图 4(d)显示了缺陷反射波到达阵列并被接收的瞬态声场。

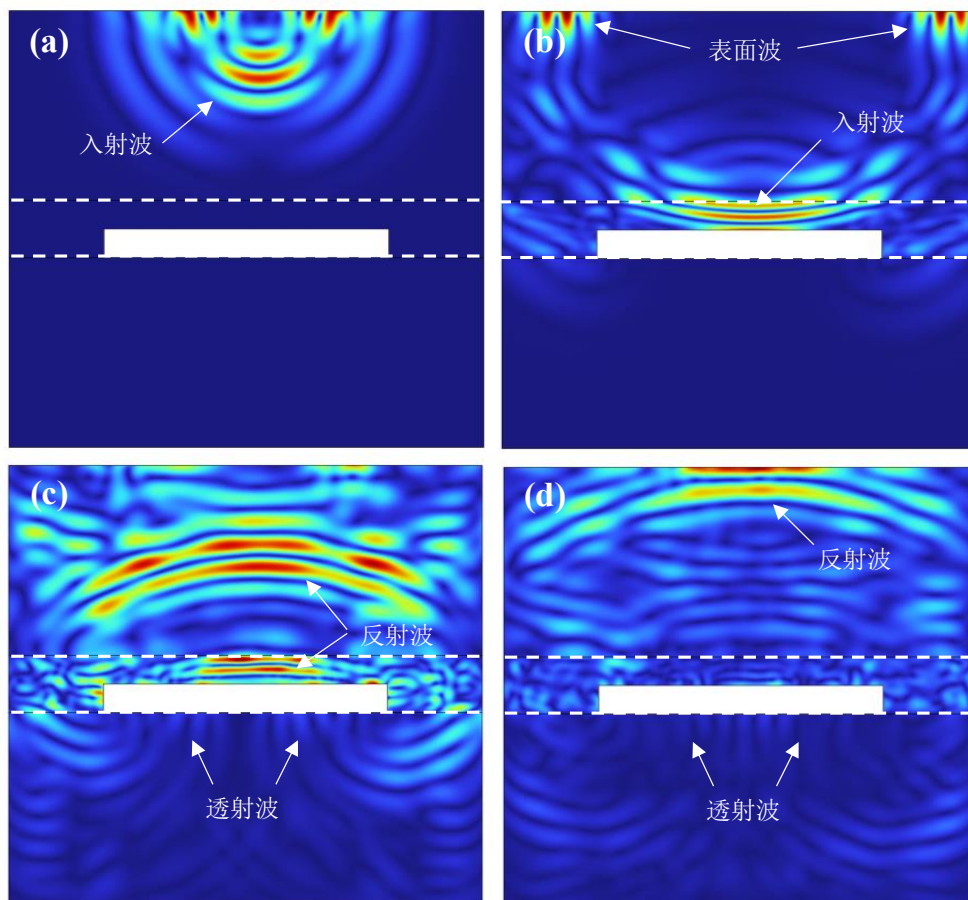


图 4 瞬态声场分布: (a) $t=59\mu\text{s}$; (b) $t=124\mu\text{s}$; (c) $t=210\mu\text{s}$; (d) $t=243\mu\text{s}$

Fig. 4 Transient sound field distribution: (a) $t=59\mu\text{s}$; (b) $t=124\mu\text{s}$; (c) $t=210\mu\text{s}$; (d) $t=243\mu\text{s}$

2.3 信号预处理

在仿真模型的缺陷信号中，表面波因其高能量密度和低速传播特性，抑制了信号幅值相对较低的缺陷散射波，并且表面波沿介质表面的长距离传播路径与缺陷散射波的传播路径部分重叠，造成了信号混叠，进而严重影响成像结果，如图 5(a)和图 5(b)所示，为了去除表面波的干扰，以第 7 个阵元激励，第 1 至第 12 阵

元依次接收的信号为例，将缺陷模型与健康模型下的接收信号进行对应相减，获得如图 5(c)所示的去除表面波后多通道散射波形。表面波的存在会严重影响成像结果，使得脱层缺陷处的强度相对较低，而抑制表面波后，脱层缺陷的成像质量明显得到提升，如图 6(a)与图 6(b)所示。

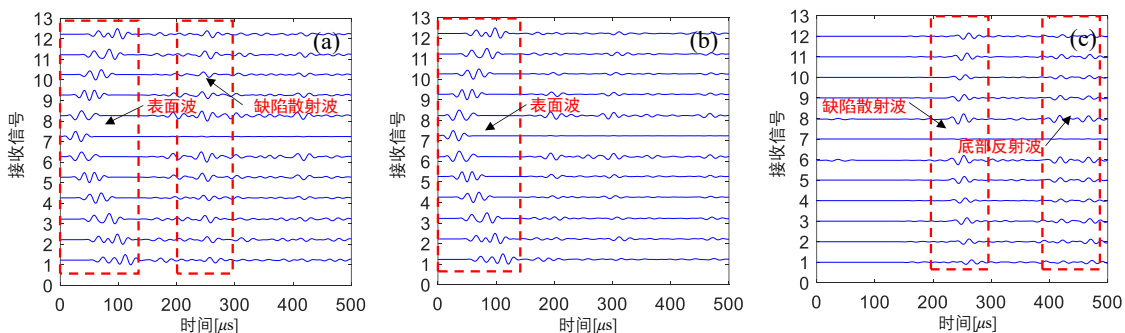


图 5 仿真模型中接收信号的处理过程: (a) 缺陷信号; (b) 健康信号; (c) 散射信号

Fig. 5 The processing of the received signal in the simulation model: (a) Defect signal; (b) Healthy signal; (c) Scattered signal

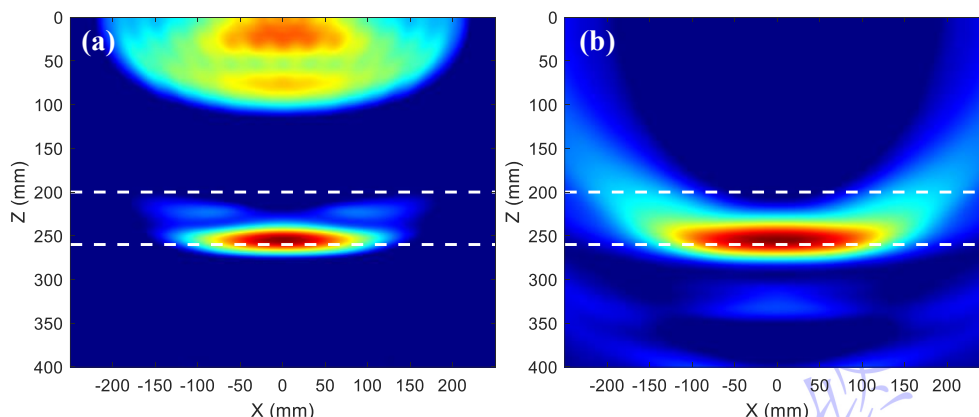


图 6 表面波抑制前后 DAS 成像对比: (a) 表面波抑制前; (b) 表面波抑制后

Fig. 6 Comparison of DAS imaging before and after surface wave suppression: (a) Defect signal; (b) Healthy signal; (c) Scattered signal

2.4 仿真结果分析

对仿真中的无砟轨道结构模型进行 DAS、RMS、SRMS 成像。为验证不同成像方法在还原缺陷真实物理轮廓及定位方面的表现，本文基于仿真系统的先验信息，统一在 $z=230\text{mm}$ 这一理论物理反射界面处绘制横向强度曲线，并在 $x=0\text{mm}$ 处的纵向强度曲线，利用 -6dB 测量法定量评估精度，根据 CR、CNR 和 pSNR 定量评估成像质量。图 7(a)-(c)为超声图像，图 7(d)-(f)为横向强度曲线，图 7(d)-(f)

为纵向强度曲线。

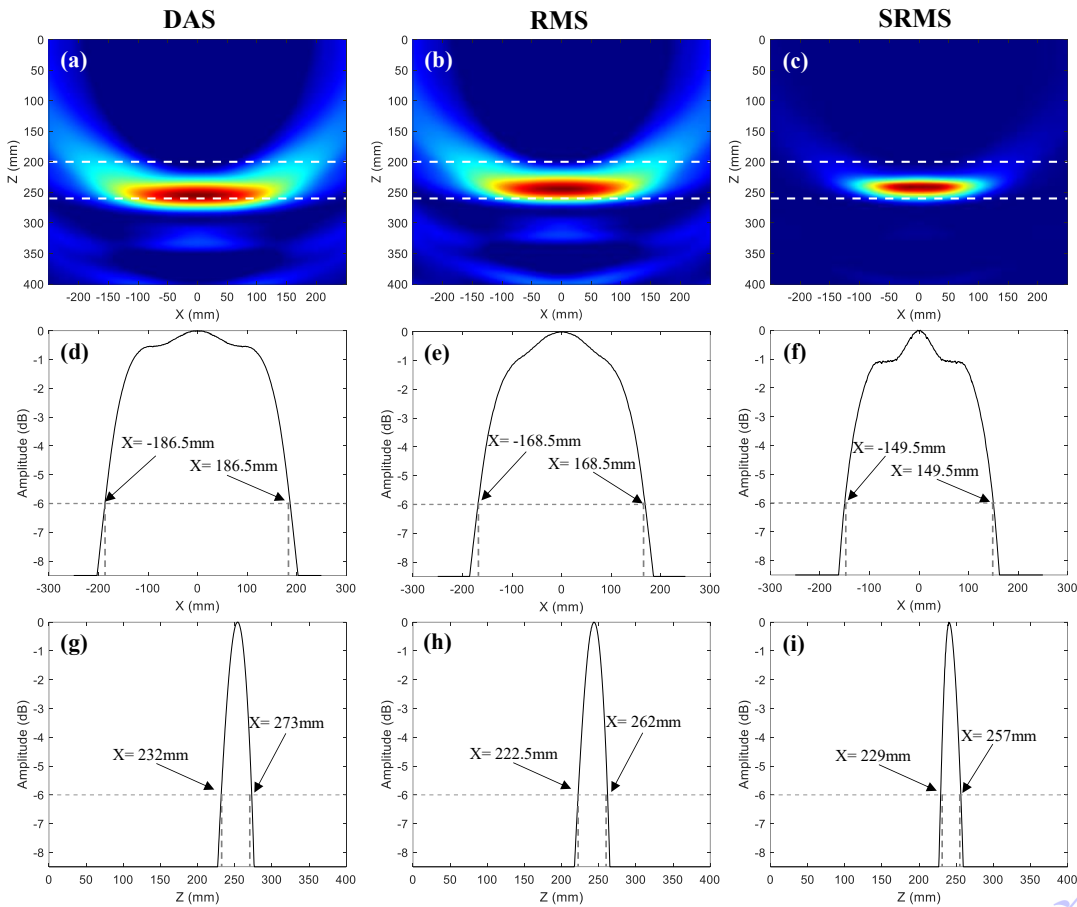


图 7 仿真成像结果对比: (a)-(c) 超声图像; (d)-(f) 横向强度曲线; (g)-(i) 纵向强度曲线

Fig. 7 Comparison of simulation imaging results: (a)-(c) Ultrasonic images; (d)-(f) Lateral intensity profiles; (g)-(i) Longitudinal intensity profiles

DAS、RMS、SRMS 方法的仿真成像结果精度对比如表 3 所示。其中脱层缺陷的横向尺寸测量的误差分别为：73.0mm、37.0mm、1.0mm，纵向定位的误差分别为 2.0mm、7.5mm、1.0mm，纵向主瓣展宽分别为 41.0mm、39.5mm、28.0mm。仿真结果表明 SRMS 方法在横向尺寸与纵向定位的测量精度上均为最高，且有效地压缩了纵向主瓣展宽。

从算法设计原理来分析，SRMS 方法通过对声场能量分布进行自适应调整，在增强缺陷回波信号的同时有效抑制噪声与旁瓣干扰。该方法引入的信号均值标准差因子能够量化局部信号的相干稳定性，在目标区域赋予高权重，而对非相干

旁瓣干扰进行抑制，从而收敛了回波在横向上的能量发散，提升了成像精度。在纵向性能表现上，SRMS 方法在保留均方根速度模型对多层介质走时偏差修正能力的基础上，利用统计特征识别并抑制了回波中因脉冲宽度引起的轴向能量发散。这种对脉冲包络宽度的自适应处理，使声学能量高度向反射中心收敛，有效压缩了纵向主瓣展宽，提升了系统的轴向分辨率以及纵向定位精度。

表 3 仿真成像结果精度对比

Table 3 Accuracy comparison of simulation imaging results

	方法	真实值/mm	检测值/mm	误差/mm
横向尺寸	DAS		373.0	73.0
	RMS	300	337.0	37.0
	SRMS		299.0	1.0
纵向定位	DAS		232.0	2.0
	RMS	230	222.5	7.5
	SRMS		229.0	1.0

DAS、RMS、SRMS 方法仿真成像结果性能对比如图 8 所示，其中成像结果图中的 CR 分别为 27.99dB、26.07dB、32.26dB，CNR 分别为 11.80dB、11.69dB、16.69dB，pSNR 分别为 24.26dB、23.52dB、41.71dB。成像结果结果表明 SRMS 方法较 DAS 方法与 RMS 方法在 CR、CNR、pSNR 三个方面上均有较大提升，其中 SRMS 方法在 pSNR 方面的提升最为显著，这表明该方法能够通过量化局部信号的强度与稳定性，有效增强脱层缺陷的回波信号，进而提高了无砟轨道结构脱层缺陷的成像质量。

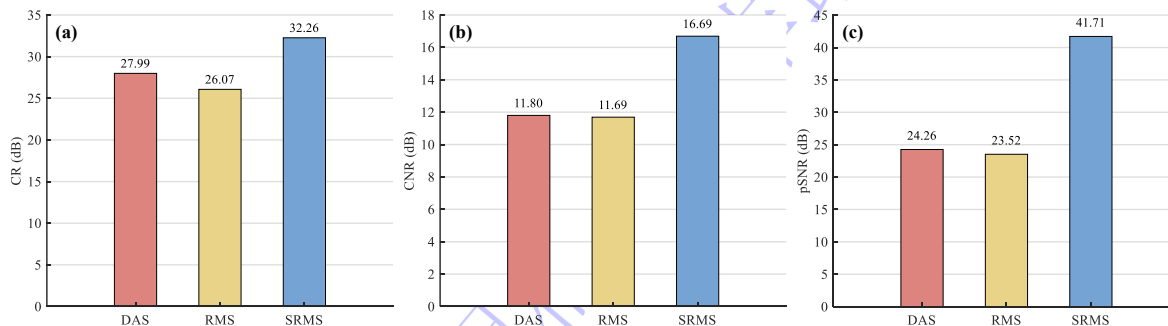


图 8 仿真成像结果性能对比柱状图: (a) CR; (b) CNR; (c) pSNR

Fig. 8 Bar Chart Comparing the Performance of simulation imaging results: (a) CR; (b) CNR; (c) pSNR

仿真结果表明，SRMS 方法通过量化局部信号的强度与稳定性，实现对各通

道回波信号的自适应增强与噪声抑制。该方法在有效修正层状结构走时偏差的基础上，通过对主瓣展宽的压缩，显著提升了系统的轴向分辨率与纵向定位精度。因此，在无砟轨道结构脱层缺陷的成像质量提升和多维度成像精度提升方面表现全面，均优于传统 DAS 和 RMS 方法。

3 实验

3.1 实验系统

本文根据《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005-2010)的相关规定，在实验室中建立了无砟轨道模型，如图 9(a)与 9(b)所示。并且在模型的第二层与第三层的界面处设置了长度为 300mm，厚度为 30mm 的脱层缺陷。由于较低频率可减少超声波衰减，扩大检测范围，而横波较短的波长则能提高缺陷分辨能力，因此实验选用 50 kHz 低频横波作为激励信号，该频率选择在保证足够穿透深度的同时，兼顾了检测灵敏度。采用 ACSYS 公司生产的 MIRA-A1040 混凝土断层超声成像仪进行数据采集。该设备由 48 个干点接触式剪切波传感器组成，排列为 12 排×4 列，其中每排的 4 个传感器构成一个独立通道，共计 12 个通道。在理想的全矩阵捕获模式下，12 个通道两两组合将产生 144 个信号对。然而，根据线性声学系统中的声学互易原理，阵元 i 发射、 j 接收的信号与阵元 j 发射、 i 接收的信号在理论上具有高度对称性，因此全矩阵的下三角部分属于冗余数据。同时，对于 50 kHz 这样的低频超声换能器，自发自收模式即矩阵的 12 个对角线元素会因探头的长时间余震产生极大的表面盲区，通常无法提取有效的深层反射信号。基于上述物理机制，该仪器在采集时自动剔除了冗余的互易信号对与无法利用的自发自收信号，仅保留了信号对矩阵的严格上三角部分。这 66 个独立信号对构成了半矩阵捕获数据，其不仅完整保留了 144 通道阵列孔径下的全场空间信息与

缺陷定位精度，还大幅降低了数据维度，有效提升了后续成像处理的计算效率。

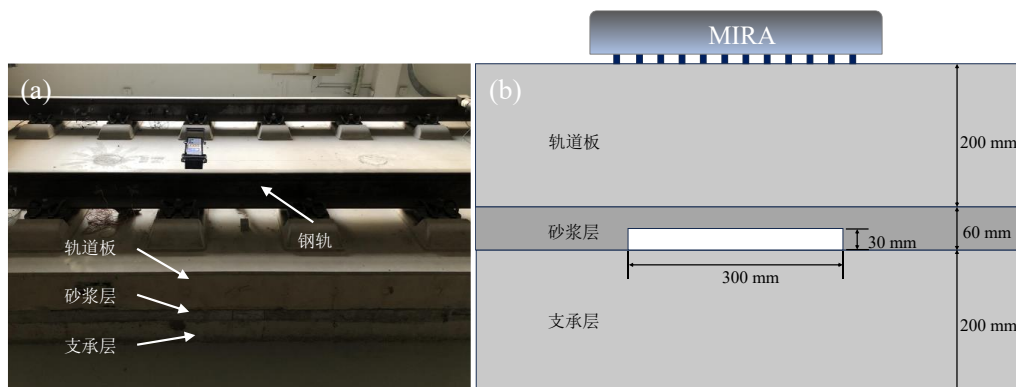


图 9 实验系统: (a) 无砟轨道模型图; (b) 无砟轨道尺寸示意图

Fig. 9 Experimental system: (a) Ballastless track model diagram (b) Ballastless track dimensional schematic

3.2 信号预处理

实验中接收到的信号通常包含表面波和较多的噪声，为了获得更好的成像效果，需要对其进行抑制。与仿真的处理方法不同，在实验中，缺陷散射波并非通过简单的信号相减所获得。可以通过加窗与滤波的方式分别实现对表面波与噪声的抑制。其中，加窗的具体过程如下：

首先，利用式(15)计算出轨道板表面波的波速 V ：

$$V = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \times \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(\frac{1}{2(1 + \nu)} \right)} \quad (15)$$

式(15)中， ν 表示材料的泊松比， ρ 表示材料的密度， E 表示材料的杨氏模量。

然后，利用式(16)求解从激励传感器 (x_i, z_i) 传播至接收传感器 (x_j, z_j) 的表面波的传播时间 t_1 ：

$$t_1 = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}}{V} \quad (16)$$

表面直达波群结束的时间 t_2 ：

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (17)$$

式(17)中, Δt 是阵元发射的有限周期脉冲宽度, 是一个常数。而 t_1 是由收发阵元的相对位置决定, 因此 t_2 也是由阵元的相对位置决定, 会随着阵元间距的增大而同步向后推移。

最后, 利用式(18)对实验信号进行加窗处理:

$$\hat{S}_{ij} = \begin{cases} \varepsilon S_{ij}(t), & t_1 \leq t \leq t_2 \\ S_{ij}(t), & t \leq t_1, t \geq t_2 \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中, \hat{S}_{ij} 表示经过表面波抑制处理后的信号, S_{ij} 表示原始信号。 t_1 为表面波的传播时间, 抑制系数 $\varepsilon=0.01$, 以保留少量表面波信息用于后续一致性校验, 而非完全置零, 避免引入人为突变。 t_2 为表面直达波群结束的时间,

如图 10 所示, 以第 1 个阵元发射, 其余阵列接收的信号集为例, 本研究采用加窗法对表面波进行了抑制。图 10(a) 显示了抑制前的原始接收信号, 可以看出, 由于表面波能量衰减小且沿表面直接传播, 其波前在各接收通道中均表现出极高的幅值, 严重掩盖了到达时间稍晚, 能量微弱的缺陷散射波。通过计算表面波的理论到达时间并施加抑制窗口, 处理后的结果如图 10(b) 所示。对比可见, 高能量的表面波成分被有效消除, 而缺陷散射波特征得以完整保留并凸显。

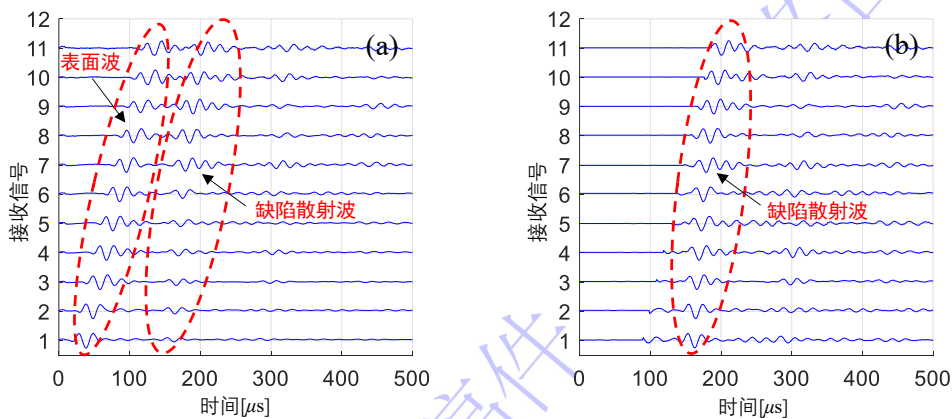


图 10 表面波抑制前后信号对比: (a) 表面波抑制前; (b) 表面波抑制后

Fig. 10 Comparison of signal before and after surface wave suppression: (a) Before surface wave suppression; (b) After surface wave suppression

如图 11(a)与图 11(b)所示, 为了更直观展示表面波对成像的影响, 分别对表面波抑制前后的信号进行成像。由于表面波的干扰, 脱层缺陷区域的信号强度相对较弱, 严重影响成像质量, 而抑制表面波后, 脱层缺陷的成像质量明显得到提升。

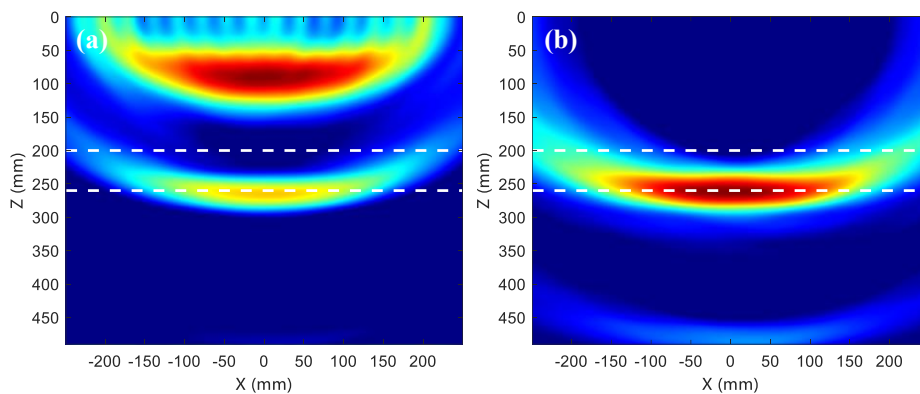


图 11 表面波抑制前后 DAS 成像对比: (a) 表面波抑制前; (b) 表面波抑制后

Fig. 11 Comparison of DAS imaging before and after surface wave suppression: (a) Before surface wave suppression; (b) After surface wave suppression

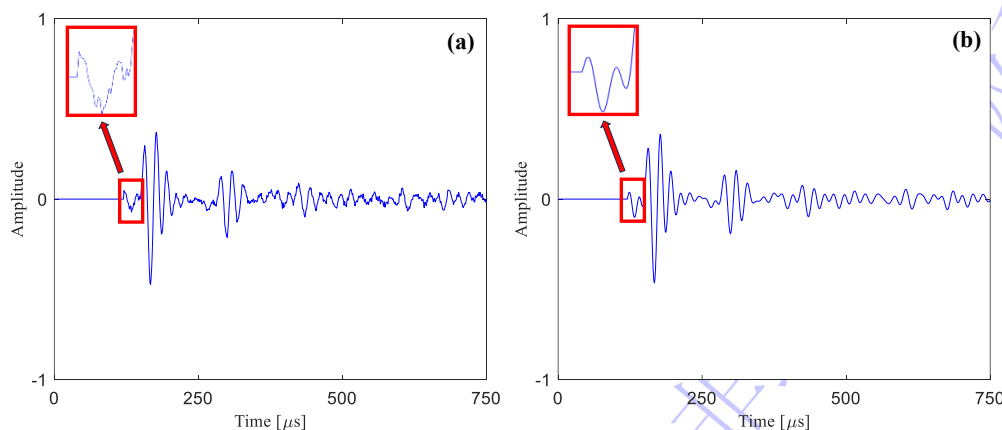


图 12 滤波处理前后信号对比: (a) 滤波处理前; (b) 滤波处理后

Fig. 12 Comparison of signal before and after filtering processing: (a) Before filtering processing; (b) After filtering processing

为了提高信噪比, 本文采用零相移切比雪夫 II 型带通滤波器对超声信号进行预处理。通带设置为 45–55 kHz, 以保留 50 kHz 的激励主瓣。低频阻带截止于 5 kHz, 以抑制低频机械振动。高频阻带起始于 85 kHz, 以滤除高频电子噪声及结

构散射噪声。通带最大衰减设为 0.1 dB 以保证波形幅值保真，阻带最小衰减设为 30 dB 以平衡噪声抑制与边缘失真。如图 12(a)与图 12(b)所示，以第 1 个阵元发射、第 3 个阵元接收的信号为例，未经滤波的原始信号包含大量高频毛刺，有效回波被掩盖。经过滤波处理后，信号波形更加平滑，主频特征得以清晰凸显。

3.3 实验结果分析

对实验中的无砧轨道结构模型进行 DAS、RMS、SRMS 成像。为验证不同成像方法在还原缺陷真实物理轮廓及定位方面的表现，本文基于实验系统的先验信息，统一在 $z=230\text{mm}$ 这一理论物理反射界面处绘制横向强度曲线，并在 $x=0\text{mm}$ 处的纵向强度曲线，利用-6dB 测量法定量评估精度，根据 CR、CNR 和 pSNR 定量评估成像质量。图 13(a)-(c)为超声图像，图 13(d)-(f)为横向强度曲线，图 13(d)-(f)为纵向强度曲线。

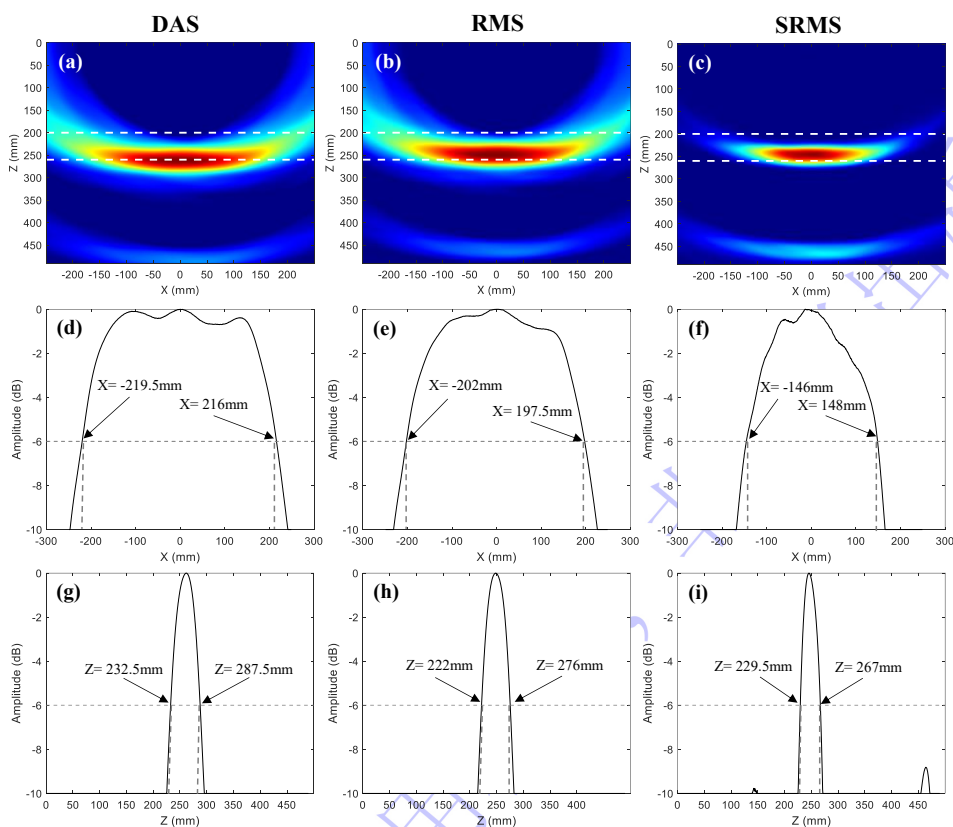


图 13 实验成像结果对比: (a)-(c) 超声图像; (d)-(f) 横向强度曲线; (g)-(i) 纵向强度曲线

Fig. 13 Comparison of experimental imaging results: (a)-(c) Ultrasonic images; (d)-(f) Lateral intensity profiles; (g)-(i) Longitudinal intensity profiles

如表 4 所示，在脱层缺陷横向尺寸测量方面，传统 DAS 算法由于未考虑多层介质的声速差异，导致声束在界面处发生折射与相位失真，横向聚焦发散。RMS 方法通过等效均方根声速模型，部分补偿了走时畸变，使横向测量误差缩小至 99.5mm。而 SRMS 方法在此基础上，利用信号均值标准差因子对空间相干性进行了量化，在目标区域赋予高权重，而对非相干旁瓣干扰进行抑制，从而收敛了回波在横向上的能量扩散，将横向测量误差降低至 6mm。

在脱层缺陷纵向定位方面，DAS 算法由于恒定声速引发的时延误差，致使回波能量的聚焦中心向深层偏移，但因其主瓣能量沿轴向发散，形成了仅 2.0mm 误差的表象。这是一种由严重下偏的能量中心与主瓣能量沿轴向发散相互抵消所产生的虚假物理精度。RMS 算法虽成功将回波的能量中心上拉至正确的时延深度，但未能压缩纵向主瓣展宽，导致回波整体上移，误差达到 7.5mm。而 SRMS 算法再继承了 RMS 正确的声速修正的基础上，通过较好的主瓣收缩能力，抑制了回波中因脉冲宽度引起的轴向能量发散，最终将脱层缺陷的纵向定位误差降低至 1.0mm。

表 4 实验成像结果精度对比
Table 4 Accuracy comparison of experimental imaging results

	方法	真实值/mm	检测值/mm	误差/mm
横向尺寸	DAS		435.5	135.5
	RMS	300	399.5	99.5
	SRMS		294.0	6.0
纵向定位	DAS		232.5	2.5
	RMS	230	222.0	8.0
	SRMS		229.5	0.5

在脱层缺陷纵向主瓣展宽方面，DAS 与 RMS 方法受限于线性叠加机制，无法克服低频长脉冲引起的轴向能量发散，导致其成像的纵向主瓣展宽分别达到 55.0mm 和 54.0mm。而 SRMS 算法有效识别了波包中低信噪比的偏离反射中心的非相干分量，并对其进行抑制，使主瓣能量向声学反射中心收敛，将展宽压缩至 37.5mm，提升了系统的轴向分辨率。

在成像质量方面，成像结果如图 14 所示，从 CR、CNR、pSNR 评价指标上可以看出，DAS 与 RMS 性能趋于相同，因为两者在信号幅度增强和噪声抑制方面的处理方式相似，虽然 RMS 能有效修正走时，但对回波幅度的增强与噪声分离效果较差，而 SRMS 引入了信号均值与标准差之比的自适应加权策略，能够对各通道回波信号的稳定性进行量化评估，显著抑制随机噪声和伪影，同时最大化真实缺陷回波的幅度响应，因此 CR、CNR、pSNR 分别提高至 17.75 dB，15.95 dB，56.23 dB，较 DAS 分别提升了 29%、18%和 164%，较 RMS 分别提升了 25%、15%和 173%，实现了脱层缺陷的高质量成像。

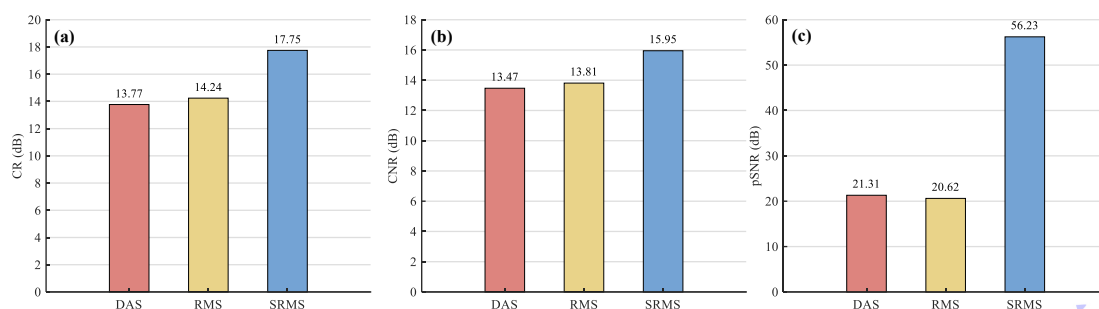


图 14 实验成像结果性能对比柱状图: (a) CR; (b) CNR; (c) pSNR

Fig. 14 Bar Chart Comparing the Performance of experimental imaging results: (a) CR; (b) CNR; (c) pSNR

在时间复杂度上，SRMS 与 DAS 均为 $O(M \times N^2)$ ，其中 M 为成像区域的像素总数， N 为阵元数量。具体而言，传统 DAS 的核心操作是对每个像素点进行 N^2 次幅值提取与线性累加。而本文提出的 SRMS 算法在遍历每个像素点时，除了执行累加操作外，还需要计算这 N^2 个通道幅值序列的统计均值与标准差，以构建自适应加权因子。虽然求取均值和标准差引入了额外的浮点乘法与开方运算，使得单一像素点的常数运算量有所增加，但其算法结构并没有增加额外的循环嵌套层数。因此，SRMS 的整体渐进时间复杂度依然严格维持在 $O(M \times N^2)$ 级别，并未引发指数级耗时增长。

为了直观量化计算代价，本研究在同一硬件平台与 MATLAB 环境下对两者的

执行效率进行了实测。针对本文无砗轨道实验模型的完整超声阵列测试数据，两种算法生成单张二维图像的平均耗时如下：DAS 算法耗时约为 1.22 秒，SRMS 算法耗时约为 2.35 秒，实测数据与理论分析高度吻合。SRMS 算法相比传统 DAS 增加了约 1.13 秒的常数级运算耗时，但这使得总耗时依然维持在极短的 2.35 秒内。SRMS 以约 1 秒的微小时间成本换取了超声图像中背景噪声的极大抑制以及缺陷定位精度的显著提升。

实验结果表明，SRMS 方法在有效补偿层状结构走时畸变的基础上，实现了脱层缺陷的高精度与高质量成像。在横向维度，该方法通过对空间相干性进行量化，抑制了因界面折射与非相干旁瓣引起的横向能量扩散，实现了缺陷几何边界的收敛。在纵向维度，该方法克服了由低频换能器固有脉冲宽度所引起的轴向能量发散，通过对主瓣展宽的非线性自适应压缩，显著提升了系统的轴向分辨率与纵向定位精度。因此，SRMS 方法在无砗轨道结构脱层缺陷的多维度成像精度与整体质量提升方面表现全面，均显著优于传统 DAS 和 RMS 方法，有效突破了传统线性叠加算法在复杂层状介质中面临的低分辨率与强伪影瓶颈，实现了脱层缺陷的高精度与高质量成像。

4 结论

针对现有混凝土层状结构脱层缺陷超声成像算法定位不准确和成像质量差的问题，本文提出了 SRMS 方法。该方法融合了自适应统计加权机制，从传播时延与通道权重两个维度同时优化了超声图像的聚焦质量与缺陷回波表达能力，实现了混凝土层状结构脱层缺陷的精确检测 and 高质量成像。

SRMS 算法不仅提高了纵向与横向的聚焦能力，更通过量化局部信号的相干稳定性，有效抑制了目标区域横向能量发散与轴向能量发散。仿真与实验结果表

明, SRMS 方法在缺陷横向尺寸上的检测误差为 6.0mm, 较 DAS 和 RMS 方法分别缩减了 129.5mm 和 93.5mm, 在纵向定位上的检测误差为 0.5mm, 较 DAS 和 RMS 方法分别缩减了 2.0mm 和 7.5mm。在纵向主瓣展宽上, 将展宽压缩至 37.5mm, 较 DAS 和 RMS 方法分别缩减了 17.5mm 和 16.5mm。

SRMS 方法通过对回波信号的强度和稳定性进行量化评估, 使得缺陷回波在叠加过程中得到增强, 同时削弱背景噪声。SRMS 方法的 CR、CNR 与 pSNR 分别达到 17.75 dB、15.95 dB 和 56.23 dB, 与 DAS 相比分别提升了 29%、18%和 164%, 与 RMS 相比分别提升了 25%、15%和 173%。

尽管 SRMS 在无砗轨道模型中表现出显著的精度优势和成像质量, 但其仍依赖准确的层参数先验。未来工作将围绕自适应层参数反演与机器学习辅助权重两个层次展开, 以期望把 SRMS 发展为适用于任意层状混凝土结构的全自动、无先验、高稳健脱层成像算法。

参考文献

- [1] Wang K, He M, Fan Z Q, Li P F 2025 *Meas. Sci. Technol.* **36** 085005
- [2] Liu J F, Wang K, Zhao M J, Chen Y J, Li X 2025 *Meas. Sci. Technol.* **36** 016164
- [3] Zhang H, Liu D J, Li J, Zhu W F, Chai X D, Fan G P, Qi W W, Xu J C, Gao C X, Zhang H Y 2025 *Nondestruct. Test. Eva.* 1-22
- [4] Helsel M A, Popovics J S, Stynoski P B, Kreiger E 2021 *NDT & E Int.* **121** 102443
- [5] Sun H, Zhu J 2020 *Ultrasonics* **103** 106096
- [6] Pooria K, Mohsen M, Ulrike D, Amir G 2023 *Constr. Build. Mater.* **403** 133062
- [7] Raach Y, Derouiche Y, Messelmi F 2020 *P. I. Mech. Eng. C-J. Mec* **234** 4239-4257
- [8] Sun M J, Cheng X Z, Wang Y, Zhang X, Shen Y, Feng N Z 2016 *Acta Phys. Sin.*

- 65 038105 (in Chinese) [孙明健, 程星振, 王艳, 章欣, 沈毅, 冯乃章 2016 物理学报 65 038105]
- [9] Ma L C, Wu S P, Wang J Y, Li D Y, Wang J F, Li G F 2024 *J. Railw. Sci. Eng.* **21** 1828-1842 (in Chinese) [马理超, 吴少培, 王健壹, 李得洋, 王剑锋, 李国芳 2024 铁道科学与工程学报 21 1828-1842]
- [10] Sun K, Nong X Z, Feng Q S, Chen H P, Xiao J H 2023 *Constr. Build. Mater.* **366** 130181
- [11] Hu M, Xu Y D, Xue Z Q, Li S Z, Zhu W J 2023 *Eng. Struct.* **292** 116552
- [12] Yoon Y G, Kim C M, Oh T K 2022 *Sensors* **22** 5484
- [13] Pei C X, Wu W J, Ueaska M 2016 *J. X-Ray Sci. Technol.* **24** 797-805
- [14] Shi M, Yang L J, Gao S W, Wang G Q 2022 *Sensors* **22** 4848
- [15] Zhang H Y, Liu Y J, Zhang H, Chen Y T, Zhu Q 2024 *Mech. Syst. Signal Pr.* **212** 111271
- [16] Zhang H, Zhang H Y, Zhu Q, Si J F, Zhao J H, Zhang M Y, Chen Y T, Huang Y Z, Piao G Y 2025 *Ultrasonics* **159** 107847
- [17] Zhang H, Zhang M, Zhang H Y, Chen Y T, Zhu W F, Zhu Q 2025 *J. Nondestruct. Eval.* **44** 21
- [18] Zhang T H, Zhang L, Ozevin D, Attard T 2023 *Meas. Sci. Technol.* **35** 035901
- [19] Lou S J, Xu K L, Jiang X, Hu B, Le L H, Ta D 2019 *Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) Glasgow, UK, October 06-09 2019* pp1882-1885
- [20] Zhao J H, Hu T Y, Zhang Q H 2022 *Sensors* **22** 3863
- [21] Yuan M D, Tse P W, Xuan W M, Xu W J 2021 *Shock Vib.* **2021** 6685450
- [22] Zhang H, Zhu W F, Fan G P, Zhang H Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 024302 (in Chinese) [张辉, 朱文发, 范国鹏, 张海燕 2023 物理学报 72 024302]
- [23] Cruza J, Camacho J 2016 *IEEE T. Ultrason. Ferr.* **63** 1581-1592

- [24] Skjelvareid M H, Olofsson T, Birkelund Y, Larsen Y 2011 *IEEE. T. Ultrason. Ferr.* **58** 1037
- [25] Jin H R, Chen J 2021 *Mech. Syst. Signal Pr.* **149** 107149
- [26] Hollman K W, Rigby K W, O'Donnell M 1999 *Proceedings of the 1999 IEEE Ultrasonics Symposium* Tahoe, NV, USA, October 17-20 1999 pp1257-1260
- [27] Li P C, Li M L 2003 *IEEE. T. Ultrason. Ferr.* **50** 128-41
- [28] Camacho J, Parrilla M, Fritsch C 2009 *IEEE. T. Ultrason. Ferr.* **56** 958-974
- [29] Wang Y G, Zheng C C, Peng H, Chen Q 2018 *Ultrasonics* **90** 32-41.
- [30] Liu Z P, Li Z L, Lyu D, Zhang Z W, Hu H W 2025 *Nondestruct. Test. Eva.* **40** 2311-2328
- [31] Pedruelo González L M, Fernández Martínez J L 2024 *Aims Math.* **9** 14997-15007
- [32] Yuan M D, Dai A B, Ma J T, Chen Y, Ji X R 2023 *Meas. Sci. Technol.* **34** 045101
- [33] Li C J, Zhang H, Qi Y, Hou C L, Zhu W F, Zhou X, Chai X D, Qi W W, Fan G P, Xu J C, Zhang H Y 2025 *Appl. Acoust.* **231** 110493
- [34] Guo X, Han Y 2021 *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2021** 2745732
- [35] Taner M T, Koehler F 1969 *Geophysics* **34** 859-881
- [36] Fomel S, Stovas A 2010 *Geophysics* **75** U9-U18

Ultrasonic Imaging of Delamination Defects in Layered Concrete Structures Based on SRMS*

Liu Dingjia¹⁾ Zhang Hui¹⁾† Zhang Haiyan²⁾† Miao Zhonghua³⁾ Xiao Aiwu⁴⁾†

1) (School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

2) (School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

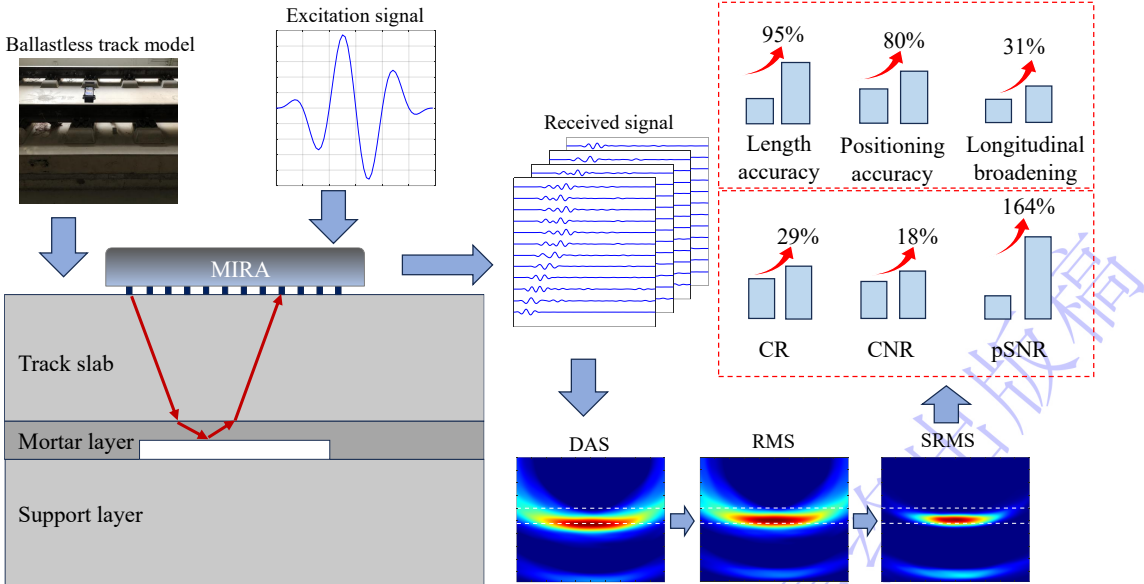
3) (School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

4) (State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

Abstract

Concrete is widely utilized in engineering due to its stability, durability, and moldability. Among various forms, layered concrete structures are extensively employed in critical infrastructure owing to their clear functional zoning and construction convenience. However, such structures are often susceptible to delamination defects during service under external loads and complex environmental conditions, significantly compromising structural safety and durability. To address the issues of inaccurate localization and poor imaging quality in existing ultrasonic imaging of delamination defects, this paper proposes an ultrasonic imaging method based on statistical-feature root-mean-square (SRMS). This method integrates an adaptive statistical weighting mechanism, optimizing the focusing quality of ultrasonic images and the representation of defect echoes from the dual dimensions of propagation time-delay and channel weighting. It not only employs a root-mean-square (RMS) velocity model to calculate the equivalent acoustic velocity to improve localization accuracy, but also quantifies the coherent stability of local signals, thereby effectively suppressing lateral and axial energy divergence in the target region. Simulations and experimental validations on delamination defects in ballastless tracks demonstrate that the SRMS method achieves detection errors as low as 6.0 mm and 0.5 mm in lateral dimension and longitudinal localization, respectively. Compared with the traditional delay-and-sum (DAS) and RMS methods, the lateral detection errors are reduced by 129.5 mm and 93.5 mm, while the longitudinal localization errors are reduced by 2.0 mm and 7.5 mm. Furthermore, this method effectively compresses the longitudinal main-lobe width to 37.5 mm, achieving reductions of 17.5 mm and 16.5 mm compared to the DAS and RMS methods,

respectively. In terms of imaging quality, because defect echoes are significantly enhanced and background noise is effectively attenuated during the superposition process, the contrast ratio (CR), contrast-to-noise ratio (CNR), and peak signal-to-noise ratio (pSNR) of the SRMS method reach 17.75 dB, 15.95 dB, and 56.23 dB, respectively. These metrics represent enhancements of 29%, 18%, and 164% over the DAS method, and 25%, 15%, and 173% over the RMS method. The proposed SRMS method not only improves the detection accuracy of delamination defects in layered concrete structures but also enhances imaging quality in complex environments.



Keywords: ultrasonic inspection, SRMS, layered structure, delamination defect

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12474457, 12374443).

† Corresponding author. E-mail: huizhang@sues.edu.cn
 † Corresponding author. E-mail: hyzh@shu.edu.cn
 † Corresponding author. E-mail: xiaoaw@snpsec.com
 The first author. E-mail: m405123211@sues.edu.cn