

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1414

张邦. 超声平面阵全聚焦三维成像方法[J]. 物探与化探, 2023, 47(5): 1273–1280. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1414>

Zhang B. Three-dimensional imaging based on the ultrasonic planar array-total focusing method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(5): 1273–1280. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1414>

超声平面阵全聚焦三维成像方法

张 邦

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 针对全矩阵—全聚焦成像数据量大与后处理效率低的问题, 提出使用平面阵全聚焦 (PATFM) 方法对平面阵数据进行成像。通过分析全聚焦成像算法特点, 结合体平面阵波场特征, 使用程函方程计算下行平面阵波前时间, 基于延时叠加原理, 利用上下行超声波传播时间改进全聚焦成像公式, 针对平面阵推导指向性和扩散校正系数, 对平面阵下方较大范围的成像点进行聚焦成像。利用 Field II 仿真, 对比了相控扫描成像、全矩阵数据采集与全聚焦成像以及平面波数据采集与全聚焦成像 3 种成像方法。结果表明, 平面阵全聚焦成像方法可以对单次平面阵数据进行大范围聚焦成像, 在获得相应精度的同时, 大大提高了计算效率, 为阵列式声波三维成像提供了可行的技术手段。

关键词: 全聚焦; 平面阵; 程函方程; 校正; 三维

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000–8918(2023)05–1273–08

0 引言

超声成像检测 (UT) 方法在医学、无损检测领域应用广泛, 随着相控超声检测 (PAUT) 的出现, 该方法以其探测范围广、分辨率高、灵敏度高等优势被广泛认可, 在应用中已出现成熟的设备以及相关的规范和标准^[1]。

随着电子计算机算力的提高, 双全法 (全矩阵采集和全聚焦法) 成为超声成像的研究热点。双全法利用全矩阵数据采集技术以及后处理技术对所有成像点进行全聚焦成像^[2], 得到的图像比 PAUT 具有更高的信噪比、分辨率以及更小的盲区。但双全法相比 PAUT 采集到的数据大几个数量级, 很难做到探测结果的实时成像^[3]。

平面波成像在一定程度综合了相控扫描成像和全聚焦成像的优点, 利用换能器阵列同时发射和接收非聚焦波束; 但是, 得到的图像信噪比、分辨率以及对比度较差。为了提高成像质量, 新的波速合成方法不断被提出来^[4], 最小方差法^[5]、短间隔空间

相干成像^[6]、相干系数方法^[7]、延时—相乘—叠加方法^[8]等自适应波束合成方法, 基于频域模型^[9]和时域模型^[10]的逆问题求解的波束合成方法以及基于深度学习的自适应波束合成^[11]、端到端波束合成^[12]、波束合成图像后处理等方法^[13]不断被提出并应用到平面波成像中。

自适应或基于逆散射的方法能有效提高成像的分辨率和对比度, 但会抑制背景散斑的强度, 且需要较强的算力支持, 而神经网络方法距实用还有较大的差距。此外, 波束合成方法无法实现探测空间的全成像点聚焦成像, 而基于延时叠加的平面波成像方法仅能对平面波区域进行成像, 对平面波区域外侧的范围只能通过控制波速偏转进行成像。

本文从全聚焦方法原理出发, 研究基于平面波数据的全成像点聚焦成像方法。利用换能器阵列发射平面波信号, 平面波信号经介质内部探测对象反射, 由面阵中各个阵元独立接收。通过求解程函方程得到面阵发射的平面波传播时间改进全聚焦成像公式, 将各阵元独立接收的数据延时叠加, 对三维空间所有成像点进行聚焦成像。

收稿日期: 2022-10-14; 修回日期: 2023-08-08

基金项目: 湖北省重点研发项目 (2021BAA050); 中铁第四勘察设计院集团有限公司重点研发项目 (2020K37)

作者简介: 张邦 (1991–), 男, 工程师, 毕业于长安大学, 主要从事铁路工程无损检测研究工作。Email: zhangbang@crfsdi.com

1 全聚焦三维成像

1.1 三维全矩阵数据采集

使用 M 行 N 列的面阵换能器阵列可采集全矩阵数据。面阵中每个换能器具有发射和接收超声信号的功能。采集过程如图 1 所示,首先激发第 1 行 1 列的阵元发射超声波,所有 $M \times N$ 个阵元接收信号,其中第 m 行 n 列阵元接收到的数据记为 $R(1, 1, m, n)$ ($1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$)。然后依次按行或列逐步增加的顺序激发 i 行 j 列 ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 阵元激发超声波,所有阵元接收信号得到数据 $R(i, j, m, n)$ 。

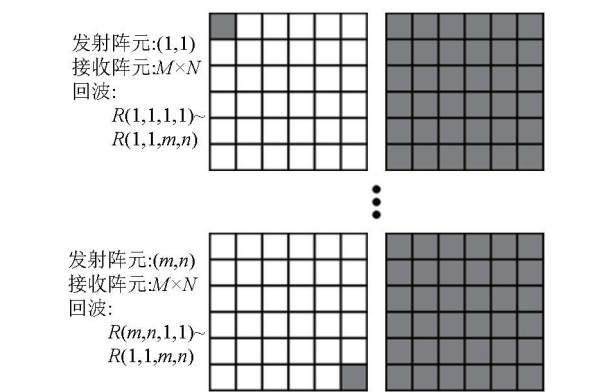


图 1 全矩阵采集示意

Fig. 1 Schematic diagram of FMC

重复上述过程完成所有阵元发射、接收信号得到三维全矩阵数据如图 2 所示。其中 $R(i, j, m, n)$ 为第 i 行 j 列阵元发射, m 行 n 列阵元接收到的每个采样时间点的信号幅值。

R (1,1,1,1)	...	...	R (1,1,2,1)	...	...	R (1,1,m,n)
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$
R (2,1,1,1)	...	...	R (2,1,2,1)	...	...	$\vdots$
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$
$\vdots$			$\vdots$			$\vdots$
R (m,n,1,1)	...	...	...	...	...	R (m,n,m,n)

图 2 全矩阵数据集示意

Fig. 2 Schematic diagram of the FMC data set

1.2 三维全聚焦成像

对于全矩阵数据三维全聚焦成像,首先要确定三维成像区域,根据分辨率划分成像网格点,利用全矩阵数据在每个成像点聚焦成像。

如图 3 所示,以面阵中心为原点建立直角坐标系, x, y 为面阵行、列方向; z 为介质方向; 成像点 P 坐标为 (x_p, y_p, z_p) ; 发射阵元 S 中心点坐标为 (x_s, y_s, z_s) ; 接收阵元 G 中心坐标为 (x_g, y_g, z_g) , 则声波从发射阵元 S 到成像点 P 的传播时间 t_s 和成像点 P 到接收阵元 G 的传播时间 t_g 分别为:

$$t_s = \sqrt{(x_s - x_p)^2 + (y_s - y_p)^2 + (z_s - z_p)^2} / v,$$
$$t_g = \sqrt{(x_g - x_p)^2 + (y_g - y_p)^2 + (z_g - z_p)^2} / v.$$

(1)

则双程传播总时间 $t = t_s + t_g$ 。

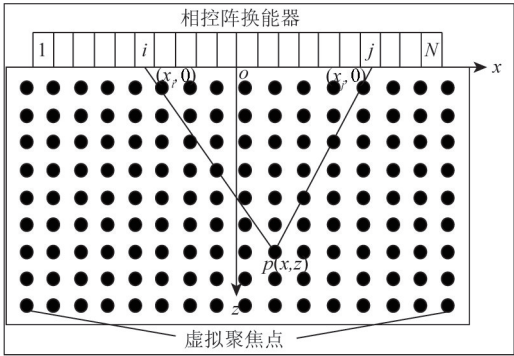


图 3 全聚焦成像示意^[14]

Fig. 3 Schematic diagram of TFM

对全矩阵数据中所有收发记录 $R(i, j, m, n)$ 中索引插值求得 t 时刻的振幅值累加求和, 可得到成像点 P 时刻的成像幅值 I_p , 计算公式如下:

$$I_p = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N R_{i,j,m,n}(t_{s,p,g}),$$

(2)

式中: $R_{i,j,m,n}$ 为 i 行 j 列阵元 S 发射, m 行 n 列阵元 G 接收的单道记录; $t_{s,p,g}$ 为发射阵元 S 到成像点 P 到接收阵元 G 的传播时间之和。

对探测区域中所有成像点的成像值 I_p 归一化显示即可得到探测区域的三维探测结果。

2 平面阵全聚焦三维成像

平面阵数据采集与全矩阵数据采集均使用所有的阵元接收信号, 二者的区别在于波场的发射过程不同。全矩阵采集通过单阵元发射球状扩散的波场信号, 需要进行 N (阵元数) 次采集, 而平面阵采集时, 所有阵元同步发射产生平面波信号, 只需要进行 1 次数据采集即可。为实现对平面阵数据成像, 需结合平面波传播时间特点进行聚焦成像。

2.1 面阵激发的时间特征

各向同性介质中声波方程如下:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - V^2 \nabla^2 \varphi = 0,$$

(3)

式中: φ 为质点位移; V 为介质中声波传播速度; t 为时间; ∇^2 为空间二阶导数算子。使用有限差分方法模拟声波在介质中的传播过程,介质表面设置一定平面范围的质点为振源,同时激发面振源,声波在面振源法线方向以平面波方式传播,在平面波之外则呈现弧形,如图 4 所示,图中红点为该切片中阵元。若以单个点振源激发,则波场传播则以球面扩散传播。

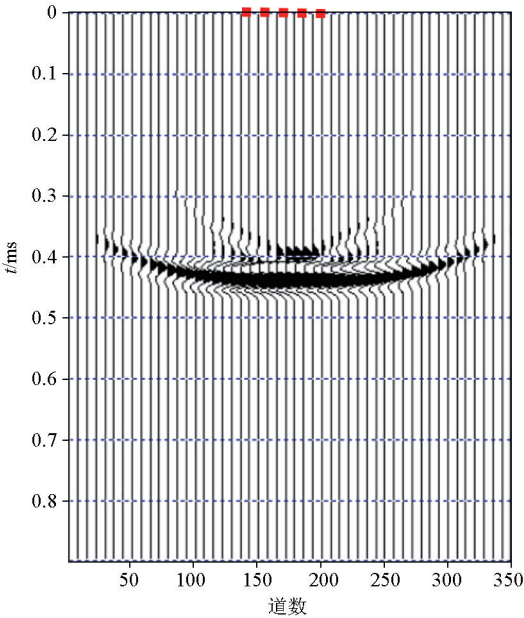


图 4 平面阵激发波场快照切片

Fig. 4 Snapshot slice of planar array excited wave field
由于波场传播的差异,无法对平面波数据使用全聚焦成像法则进行成像,首先需要针对平面波场计算平面阵声波到达成像点的时间。

2.2 快速步进法计算下行波时间

快速步进法 (fast marching method, FMM) 基于程函方程计算波场传播时间,本文利用程函方程求解平面阵中所有阵元同步激发时的平面波传播时间。三维情况下程函方程^[15]为

$$\left[\frac{\partial t(x,y,z)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial t(x,y,z)}{\partial y} \right]^2 + \left[\frac{\partial t(x,y,z)}{\partial z} \right]^2 = s^2(x,y,z), \quad (4)$$

式中: t 为声波传播时间; s 为声波在介质中传播的慢度 (速度的倒数)。

FMM 方法使用迎风差分格式和窄带法求解程函方程,式(4)使用迎风有限差分格式^[15]为

$$\left[\begin{matrix} \max(D_{i,j,k}^{-x}t, -D_{i,j,k}^{+x}t, 0) + \\ \max(D_{i,j,k}^{-y}t, -D_{i,j,k}^{+y}t, 0) + \\ \max(D_{i,j,k}^{-z}t, -D_{i,j,k}^{+z}t, 0) \end{matrix} \right]^{1/2} = s_{i,j,k}, \quad (5)$$

式中: $D_{i,j,k}^{-x}$ 、 $D_{i,j,k}^{+x}$ 、 $D_{i,j,k}^{-y}$ 、 $D_{i,j,k}^{+y}$ 、 $D_{i,j,k}^{-z}$ 、 $D_{i,j,k}^{+z}$ 为传播时间

t 在网格节点 i,j,k 处在 x,y,z 方向向前和向后的差分算子。一阶迎风差分算子^[15]为:

$$\begin{aligned} D_{i,j,k}^{-x}t &= \frac{t_{i,j,k} - t_{i-1,j,k}}{\Delta x}, D_{i,j,k}^{+x}t = \frac{t_{i+1,j,k} - t_{i,j,k}}{\Delta x}; \\ D_{i,j,k}^{-y}t &= \frac{t_{i,j,k} - t_{i,j-1,k}}{\Delta y}, D_{i,j,k}^{+y}t = \frac{t_{i,j+1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta y}; \\ D_{i,j,k}^{-z}t &= \frac{t_{i,j,k} - t_{i,j,k-1}}{\Delta z}, D_{i,j,k}^{+z}t = \frac{t_{i,j,k+1} - t_{i,j,k}}{\Delta z}. \end{aligned} \quad (6)$$

迎风格式计算网格节点处的传播时间的实现过程如图 5 所示,将网格划分为 3 个区域,即上风区、窄带区以及下风区。上风区 (图中黑点区域) 为已计算完成的区域,该区域网格节点处的时间为振源经过该点时的最小时间。窄带区 (图中灰点区域) 为波前面网格点,按式(6)计算网格点最小传播时间,通过排序方法取该区域最小时间点划分到上风区。下风区 (图中白点区域) 为待计算时间的网格节点区域。

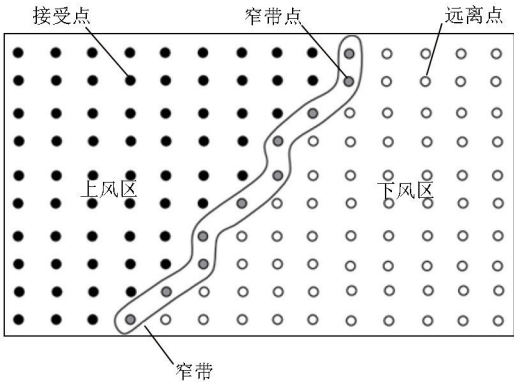


图 5 FMM 波前传播示意

Fig. 5 Diagram of FMM wavefront propagation
计算开始时,将面阵中各个阵元点同时激活,赋初始值为 0,其他网格点赋值为无穷大,计算过程中波前面逐渐向外扩散传播,计算完成后,所有网格节点时间均为声波从平面阵到各网格节点传播的最小时间。该方法还可用于相控波场传播时间的计算,通过给面阵中各阵元不同延时的初值还可以计算不同偏转角度的平面波到达时。

建立长宽 4 m、深 10 m、速度 4 500 m/s 的简易模型,在模型顶面设置长宽为 28 cm 的 7×7 平面阵激发超声平面波,在 $x=2$ 和 $z=5$ 的位置提取等时切片如图 6 所示。

2.3 面阵全聚焦三维成像

根据全聚焦成像式(2),其核心思想是求得声波从发射阵元到成像点再到接收阵元的传播时间 $t_{(s,p,g)}$,再从全矩阵数据中的每一道记录计算 t 时刻的振幅值累计求和。然而平面阵换能器激发的平面

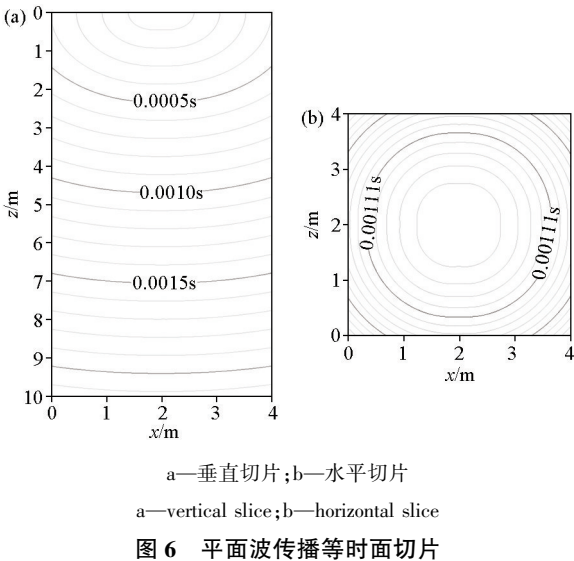


图 6 平面波传播等时面切片

Fig. 6 Slice diagram of plane wave direct wave front isochron
波传播到成像点的时间并不能使用简单的式(2)计算得到。

本文针对各向同性均匀介质中的缺陷、空洞的全矩阵—全聚焦成像检测提出改进方法,采用面阵采集,优化成像公式。平面阵全聚焦成像过程如图 7 所示,平面换能器阵列中所有阵元同步激发产生平面波向下传播,平面波在探测对象处—产生反射,此时反射点可以看作次级振源,反射回的波场被所有阵元独立的接收,得到平面阵数据 $R(m,n)$ 。因此,超声波的发射过程可以利用 FMM 方法求解程函方程可得到平面波到成像点的传播时间 t_s ,而从成像点到接收阵元的传播时间 t_g 则可以沿用前文计算式(1)得到,则声波双程传播总时间 $t=t_s+t_g$ 。

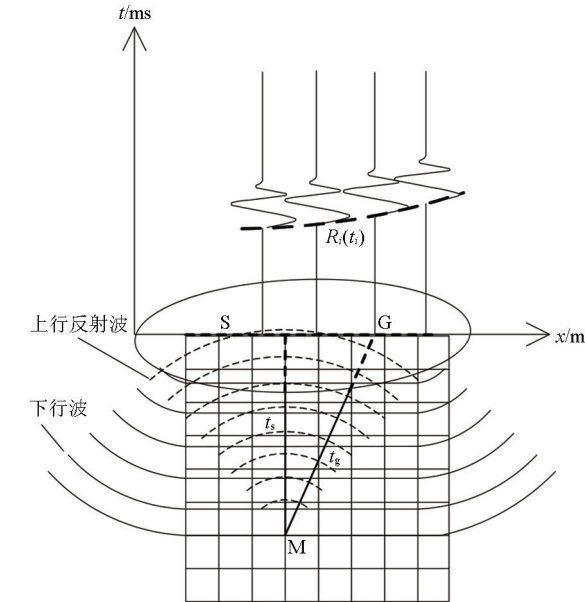


图 7 平面波全聚焦成像示意

Fig. 7 Schematic diagram of plane array TFM

对平面阵数据中所有接收记录 $R(m,n)$ 中索引插值得求 t 时刻的振幅值累加求和可得到成像点 P 时刻的成像幅值 I_p ,计算公式^[16]如下:

$$I_p = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N R_{m,n}(t_{s,p,g}), \tag{7}$$

式中: $R_{m,n}$ 为 m 行 n 列阵元接收的单道记录; $t_{s,p,g}$ 为发射阵元 S 到成像点 P 到接收阵元 G 的传播时间之和。对探测区域中所有成像点的成像值 I_p 归一化显示即可得到探测区域的三维探测结果。

对于各向同性均匀介质,用于计算传播时间 $t_{s,p,g}$ 的声速模型可以通过在检测面测试得到。若检测对象介质复杂,还需要更进一步的优化超声传播时间计算方法。

2.4 全聚焦成像数据校准

从全聚焦成像式(2)和(7)中可以看出,全矩阵数据或平面阵数据全部参与了成像点的成像值计算,然而,由于超声换能器的指向性特点,其能量分布在不同的方向上强度也不同,需要进行校准。超声波发射过程是整个平面阵激发,需要使用面阵校准,接收过程是单个阵元单独接收,需要进行单阵元校准。

1)指向性校准。对于 $M \times N$ 面阵,可以看做 M 列长度为 L_n 的线阵元复合而成,其中 M 阵元方向为 x , N 阵元方向为 y ,沿介质方向为 z 。如图 8 所示 L_n 为 N 阵元方向长度, α 为成像点在面阵平面投影与 x 方向的夹角, θ 为成像点与面阵中心在面阵平面的夹角。

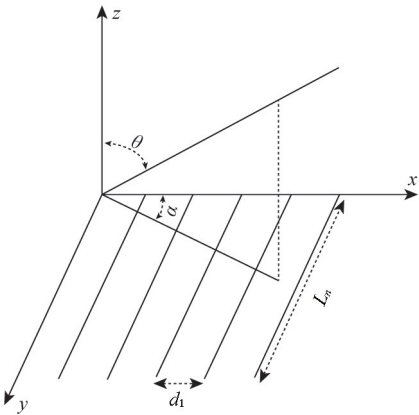


图 8 线阵复合平面阵

Fig. 8 Linear composite planar array

则线阵元指向性函数^[16]为

$$D_1(\alpha,\theta) = \text{sinc}\left(\frac{kL}{2}\sin\alpha\sin\theta\right), \tag{8}$$

式中: k 为波数, $k=2\pi/\lambda$,对于均匀的线阵,其指向性函数^[17]为

$$D_2(\alpha,\theta)=\frac{\sin\left[\frac{kMd_1}{2}\cos\alpha\sin\theta\right]}{M\sin\left[\frac{kd_1}{2}\cos\alpha\sin\theta\right]}, \quad (9)$$

式中: M 为面阵的行数; d_1 为线阵元之间的间距。复合面阵指向性函数^[17]为

$$D_s=D_1\times D_2, \quad (10)$$

当校正接收波场时,采用单阵元指向性校正公式^[16]:

$$D_g=\text{sinc}\left(\frac{\pi a\sin\beta}{\lambda}\right), \quad (11)$$

式中: D_g 为接收波场指向性; a 为阵元宽度; β 为成像点与接收阵元在 z 方向的夹角; λ 为超声波在介质中传播波长。

2)传播衰减校准。三维空间中声波由发射点到接收点的幅值衰减与传播距离 d_g 之间的关系为

$$A_x=\frac{A_0}{4\pi d_x}, \quad (12)$$

式中: A_0 表示发射信号幅值; A_x 为声波传播距离 d_x 衰减后的幅值。

由面振源发射声波到成像点 P 处的声波衰减系数^[16]为

$$B_s=\sum_{m=1}^M\sum_{n=1}^N\frac{1}{4\pi d_s}, \quad (13)$$
$$B_g=\frac{1}{4\pi d_g}。$$

式中: d_s 为 m 行 n 列阵元到成像点距离; d_g 为成像点到 m 行 n 列接收阵元的距离。

总的校准系数^[16]可表示为

$$C_{s,p,g}=D_s\times D_g\times B_s\times B_g, \quad (14)$$

校准后的全聚焦公式^[16]为:

$$I_p=\sum_{m=1}^M\sum_{n=1}^N\frac{R_{m,n}(t_{s,p,g})}{C_{s,p,g}}。 \quad (15)$$

3 仿真试验

本文使用 Filed II 工具包对面阵换能器探测灰岩中溶腔进行仿真(图 9、图 10),建立三维模型,模型 x,y 方向范围为 $-3\sim 3\text{ m}$, z 方向深度为 $0\sim 10\text{ m}$ 。模型中不同位置设置 3 个大小不同的溶腔(如图 10a 所示)。

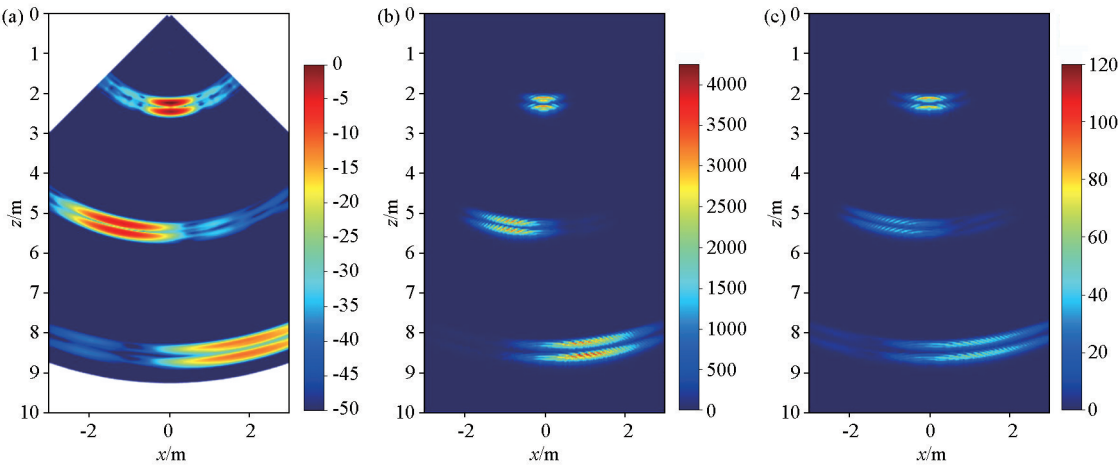
设置灰岩声波速度 $v=4\,500\text{ m/s}$,采用 7×7 换能器阵列进行探测,换能器中心频率 $f_0=45\text{ kHz}$,采样频率为 $f_s=1\text{ MHz}$,阵元间距 0.05 m ,阵元大小 0.04 m ;采用正弦脉冲激励,激励窗口为 2 个周期。

分别使用面阵发射延迟相控扫描成像、全矩阵采集—全聚焦成像与平面阵采集—全聚焦成像进行数据采集仿真与成像。

首先模拟针对该模型使用相控扫描成像,利用面阵换能器聚焦特性进行,采用延迟发射的方式控制波速偏转角度,沿 x 方向对面阵换能器下方 $-50^\circ\sim 50^\circ$ 范围进行扫描成像,成像结果如下图 9a。

其次采用全矩阵方式采集 7×7 矩阵的数据,得到 2 401 道全矩阵记录。对全矩阵数据进行全聚焦成像,成像结果在 x 方向 $y=0$ 的剖面如下图 9b,三维成像结果如图 10b。

然后采用平面阵方式采集数据,得到 49 道平面阵记录。对平面阵数据进行全聚焦成像,结果在 x

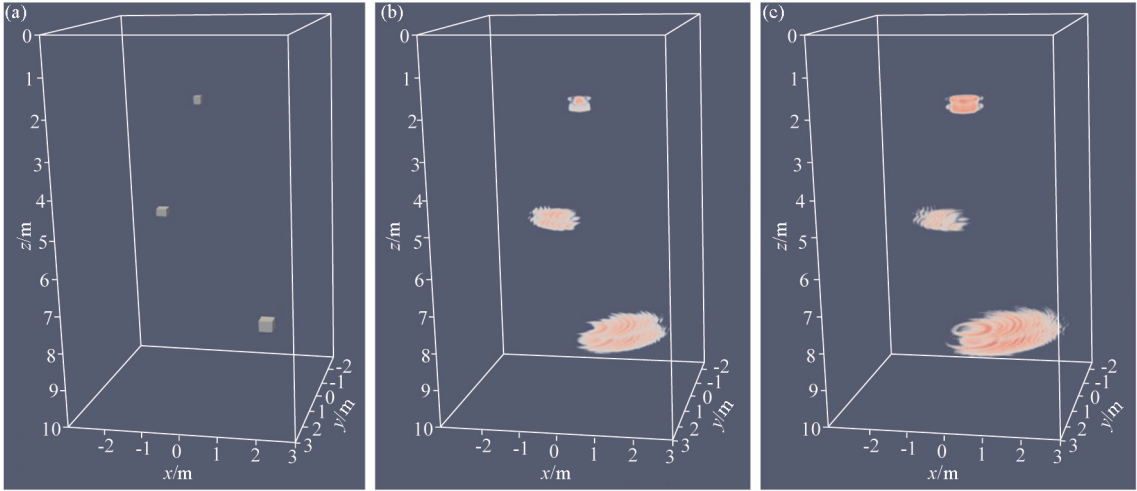


a—相控扫描成像剖面;b—双全法成像剖面;c—平面阵全聚焦成像剖面

a—phased scan imaging profile;b—FMC-TFM imaging profile;c—PATFM 3D imaging profile

图 9 Field II 仿真三维成像切片

Fig. 9 Field II simulation 3D imaging slice diagram



a—三维模型;b—双全法三维成像;c—平面阵全聚焦三维成像
a—3D model;b—FMC-TFM 3D imaging;c—PATFM 3D imaging

图 10 全聚焦三维成像

Fig. 10 TFM 3D image

方向 $y = 0$ 的剖面如下图 9c, 三维成像结果如图 10c。图 9 可以看出使用相控扫描成像方法使用边长约为 0.35 m 的换能器阵列可以探测到较大范围的溶腔, 但是成像质量较差, 分辨率较低, 且溶腔所在深度存在较强的弧形假干扰。使用双全法的成像效果和平面阵全聚焦方法接近, 均可以较好地探测到溶腔位置, 且分辨率相比相控扫描方式大大提高。相比双全法的全矩阵数据叠加, 平面阵聚焦成像通过单次数据采集成像, 成像能量有所降低。

图 10b、c 所示为相同视角下三维溶腔模型、双全法和平面阵全聚焦法三维成像结果对比, 顶部蓝色区域为边长 0.35 m 的面阵换能器。从图中来看双全法成像聚焦性要优于平面阵全聚焦方法, 但是从整个过程来看, 双全法数据采集需要实现 N (N 为所有阵元数, 下同) 次发射接收, 而平面阵全聚焦方法只需要 1 次即可。双全法得到的数据量和成像计算时间是平面阵全聚焦方法的 N 倍。以上述 7×7 阵列仿真情况为例, 数据采集样点数为 5 000, x 、 y 方向成像范围为 $-3 \sim 3$ m, z 方向成像范围为 $0 \sim 10$ m, 成像点间隔 0.02 m, 聚焦成像点数为 $301 \times 301 \times 501$ 个, 仿真及计算情况对比如表 1。

表 1 中聚焦计算使用 Intel Xeon Silver 10 核处

表 1 全矩阵全聚焦成像与平面阵全聚焦成像对比

Table 1 Comparison between full matrix full focus imaging

and planar array full focus imaging

项目	全矩阵—全聚焦 FMC-TFM	平面阵—全聚焦 PA-TFM
采集次数	49	1
数据量/KB	46894.5	957
聚焦耗时/s	1195.8	94.6

理器, 计算主频 2.2 GHz。平面阵全聚焦成像耗时包含了 FMM 方法计算平面波传播时间的耗时 64.7 s, 总耗时大约是双全法计算时间的 1/10, 若探测对象为速度接近的均匀各向同性完整岩体, 该计算过程还可以通过给定时间表进行替换, 计算速度还可以进一步提升。

由于面阵换能器大小有限, 而探测范围较大, 探测结果中溶腔异常与实际模型相差较大, 为提高探测精度, 增加换能器规模。本文使用 16×16 换能器阵列对相同模型进行仿真模拟, 使用平面阵全聚焦方式成像结果如下图 11, 图中红框为模型位置, 设置

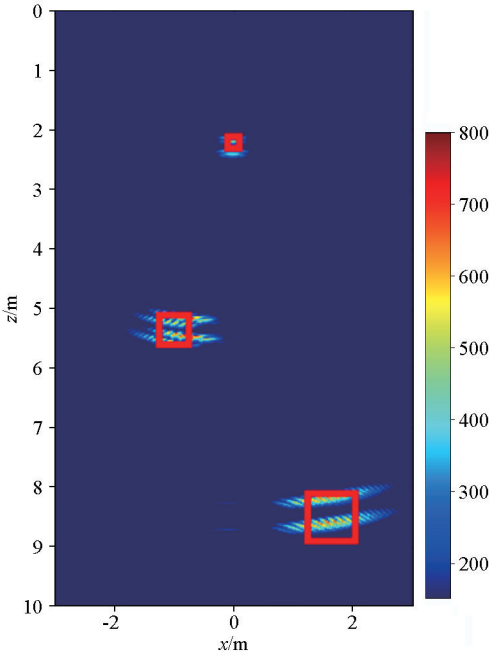


图 11 16×16 平面阵全聚焦成像剖面

Fig. 11 TFM slice diagram of 16×16 planar array

色标阈值为[150,800]时, 三处反射能量团能范围基本与模型吻合, 相比 7×7 面阵换能器成像精度大大提高。

4 结论

本文从全聚焦方法原理出发, 提出基于平面阵数据的全成像点聚焦成像方法(PATFM), 采用平面阵激发超声平面波, 各阵元独立接收信号得到平面阵数据。通过求解程函方程得到超声波传播时间改进全聚焦成像公式对平面阵数据延时叠加进行聚焦成像。

使用双全法和平面阵全聚焦方法相比相控扫描成像均可以对面阵前方一定角度范围内全成像点进行聚焦成像。相比双全法成像, 平面阵全聚焦成像的数据采集过程大大的简化, 而且极大地减少了数据量与成像计算时间。

平面阵全聚焦方法通过单次数据采集成像, 相比双全法的全矩阵数据叠加, 成像能量和信噪比会有所降低, 后续可以通过换能器发射延迟使平面波方向偏转, 再结合全聚焦成像的方法提高成像精度与范围。该方法同样适用于线阵全聚焦方法, 可对多条线阵采集的数据进行三维成像。

参考文献 (References) :

[1] 李衍. 超声相控阵与全聚焦法成像特性比照评析[J]. 无损探伤, 2021, 45(1) : 1-6.
Li Y. Comparative analysis of imaging characteristics of ultrasonic phased array and total focusing method[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 45(1) : 1-6.

[2] 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 D, Gui J, Zhou Z H. A review of total focusing method for ultrasonic phased array imaging[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(4) : 320-325.

[3] 黄文大, 李衍. 全矩阵捕获和全聚焦法相控阵成像检测技术[J]. 无损检测, 2021, 43(11) : 72-78.
Huang W D, Li Y. FMC and TFM phased array imaging detection technology[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(11) : 72-78.

[4] 张经科, 何琼, 罗建文. 平面波超声成像中的波束合成方法研究进展[J]. 应用声学, 2021, 40(1) : 22-32.
Zhang J K, He Q, Luo J W. Research progress of beamforming methods in plane-wave ultrasound imaging[J]. Journal of Applied Acoustics, 2021, 40(1) : 22-32.

[5] Vignon F, Burcher M R. Capon beamforming in medical ultrasound

imaging with focused beams[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(3) : 619-628.

[6] Chau G, Lavarello R, Dahl J. Short-lag spatial coherence weighted minimum variance beamformer for plane-wave images[C]//IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, IEEE, 2016.

[7] Lokesh B, Thittai A K. Spatial resolution improvement in plane wave imaging using adaptive sign coherence factor weighting[C]//IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, IEEE, 2016.

[8] Moubark A M, Alomari Z, Harput S, et al. Enhancement of contrast and resolution of B-mode plane wave imaging (PWI) with non-linear filtered delay multiply and sum (FDMAS) beamforming[C]//IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2016.

[9] Zhang B, Robert J L, David G. Dual-domain compressed beamforming for medical ultrasound imaging[C]//2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2015.

[10] Besson A, Perdios D, Martinez F, et al. Ultrafast ultrasound imaging as an inverse problem; Matrix-free sparse image reconstruction[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(3) : 339-355.

[11] Wiacek A, Gonzalez E, Bell M A L. CohereNet: A deep learning architecture for ultrasound spatial correlation estimation and coherence-based beamforming[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(12) : 2574-2583.

[12] Hyun D, Brickson L L, Looby K T, et al. Beamforming and speckle reduction using neural networks[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE, 2019, 66(5) : 898-910.

[13] Zhang X, Liu J, He Q, et al. High quality reconstruction of plane-wave imaging using generative adversarial network[C]//IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018.

[14] 张杰, 莫润阳. 超声相控阵全聚焦成像算法比较分析[J]. 声学技术, 2021, 40(1) : 71-76.
Zhang J, Mo R Y. Comparative analysis of total focusing method in ultrasonic array imaging algorithms[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1) : 71-76.

[15] 李永博. VTI 介质及复杂模型 FMM 射线追踪方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Li Y B. Study on FMM ray tracing method for VTI media and Complex Model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[16] 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 Z G, Peng D, Li Y, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10) : 1-7.

[17] 巩建辉, 严碧歌. 线阵组合平面阵的指向性研究[J]. 南阳师范学院学报, 2011, 10(6) : 21-24.
Gong J H, Yan B G. Research on directivity of linear array combined with planar array [J]. Journal of Nanyang Normal University, 2011, 10(6) : 21-24.

Three-dimensional imaging based on the ultrasonic planar array-total focusing method

ZHANG Bang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Group Co. ,Ltd. ,Wuhan 430063 ,China)

Abstract: Given large data volumes and low post-processing efficiency of full matrix capture-total focusing imaging, this study proposed a planar array-total focusing method(PATFM) for the imaging of planar array data. First, the wave front time of the downgoing planar array was calculated using the eikonal equation based on the characteristics of both the total focusing imaging algorithm and the planar array wave field. Then, the total focusing imaging formula was improved using the upgoing and downgoing ultrasonic propagation time based on the delay superposition principle. Finally, focusing imaging was performed on a wide range of imaging points below the planar array aiming at the derived directivity and diffusion correction coefficient of the planar array. Through Field II simulation, the PATFM was compared with three imaging methods, including phase-controlled scanning imaging, full matrix capture-based total focusing imaging, and plane wave capture-based total focusing imaging. The results show that the PATFM can be used for large-range focusing imaging of single planar array data, greatly improving the computational efficiency while obtaining corresponding accuracy. Therefore, this study provides a feasible technical means for 3D imaging of array acoustic waves.

Key words: total fousing; planar array; eikonal equation; correction; 3D

(本文编辑:叶佩)