

非线性合成孔径聚焦超声成像

罗 斌¹ 王邓志² 罗宏建¹ 刘一舟¹

(1 武汉大学动机学院 武汉 430072)

(2 九江学院材料工程系 九江 332005)

2002 年 11 月 4 日收到

摘要 论文介绍了合成孔径聚焦超声成像系统原理。建立了一个无损检测超声成像系统。同时,为了进一步提高分辨率,设计了基于相关系数的非线性合成孔径聚焦算法。然后利用此算法对试块成像,结果表明,与延时叠加合成孔径算法相比,基于相关性分析的非线性合成孔径算法提高了图像的分辨率,改善了图像质量。

关键词 合成孔径, 无损检测, 超声成像, 相关系数

Non-linear synthetic aperture focusing for ultrasonic imaging

LUO Bin¹ WANG Dengzhi² LUO Hongjian¹ LIU Yizhou¹

(1 M.E Dept of Wuhan University, Wuhan 430072)

(2 M.E. Dept of Jiujiang University, Jiujiang 332005)

Abstract This paper mention briefly the principle of ultrasonic imaging system based on Synthetic Aperture Focusing Technology, and show an ultrasonic imaging system for NDT. At the same time, to improve the resolution, the authors design a non-linear SAFT algorithm based on the concept of correlation coefficient, uses the algorithm to reconstruct an ultrasonic imaging for a specimen, Results of the test indicate: compare to the time-delay SAFT principles, the SAFT principle based on the concept of correlation analysis improved the axial resolution and meliorated the imaging shaping effectively.

Key words Synthetic aperture focusing technology, No destructive testing, Ultrasonic imaging, Correlation coefficient

1 引言

合成孔径聚焦 (SAFT) 成像是 20 世纪 70 年代发展起来的一种比较有潜力的成像方法,它通过将阵列小探头接收的声信号合成处理而得到与较大合成孔径等效的的声学像。与传统的超声成像方法不同, SAFT 成像可以通过低的工作频率和较小的换能器孔径以获得较好的

分辨率^[1,2]。

在实际应用中,由于原始信号带限和噪声的影响,传统的延时叠加合成孔径算法存在提高成像的分辨率和抑制原始信号信噪比影响的矛盾。为了进一步改善图像的成形质量,作者基于在超声检测过程中,相邻探头位置的缺陷回波信号之间具有较好的相关性,而结构噪声信号之间的相关性很差这一特点,在 SAFT 基本

原理的基础上,提出了一种基于相关性分析的非线性合成孔径算法。即在进行超声信号数字成像处理时,根据信号之间相关系数的不同,对信号幅值进行非线性修正,得到非线性 SAFT 超声成像算法。实验结果表明,与延时叠加合成孔径算法相比,基于相关性分析的非线性合成孔径算法提高了图像的分辨率,改善了图像质量。

本文介绍了一个应用于无损检测的 SAFT 超声成像试验系统。作者通过对一个包含多个横通孔的有机玻璃试块进行 2D-SAFT 超声成像,验证了不同的成像算法对超声数字成像质量的改善效果。

2 SAFT 算法基本原理

如图 1 所示:在进行 2D-SAFT 聚焦超声成像时,收发共置的超声探头在一条直线上做等间距 (Δx) 扫描,在每一点超声探头发射一个超声脉冲并接收物体内部各点的反射回波,图 1 中,把探头在第 j 个位置接收到的位于深度为 i 的缺陷点的回波数据记为 $S(i, j)$,其中, j 为位于 $-N$ 到 $+N$ 之间的值。SAFT 的基本公式为^[3,4]:

$$S(i, j) = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N}^N S\left(\frac{2R_{ij}}{c}, j\right) \quad (1)$$

式中 c 是超声波在物体中的传播速度。

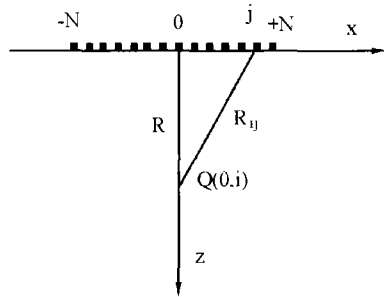


图 1 合成孔径原理图

3 非线性 SAFT 算法

为了进一步提高成像系统的分辨率,在

SAFT 基本原理的基础上设计了非线性 SAFT 算法。在介绍非线性 SAFT 算法前,先引入相关性的概念。

在信号分析中,相关性是一个很重要的概念。所谓“相关”,是指变量之间的一种线性关系。对于确定性信号来说,两变量之间可以用函数关系来描述,两者具有一一对应关系。而随机变量之间就不具有这样的确定关系。在合成孔径聚焦超声成像中,研究任意两列信号之间的相关性是一件很有意义的事情。

第 X 列信号 $S(i, x)$ 和第 Y 列信号 $S(i, y)$ 之间的相关性可以用它们之间的相关系数 $\rho_{x,y}$ 来描述^[5]:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}[S(i, x), S(i, y)]}{\sqrt{D(S(i, x))D(S(i, y))}} \quad (2)$$

公式 (2) 中:

$$\text{cov}(S(i, x), S(i, y)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S(i, x) - \overline{S(i, x)}] \times [S(i, y) - \overline{S(i, y)}] \quad (3)$$

$$D(S(i, x)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S(i, x) - \overline{S(i, x)}]^2 \quad (4)$$

$$D(S(i, y)) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S(i, y) - \overline{S(i, y)}]^2 \quad (5)$$

$\rho_{x,y}$ 可以用来评定两列信号之间的相关程度,其变化范围是从 -1 到 $+1$ 。当 $\rho_{x,y} = \pm 1$ 时,表示第 x 列和第 y 列信号完全(或逆)线性相关。 $\rho_{x,y}$ 位于 -1 到 $+1$ 之间时,表示第 x 列和第 y 列信号有一定的相关性。

通过实验可以知道,在无损检测过程中,缺陷回波信号之间具有较好的相关性。而噪声信号之间的相关性很差。在进行幅值叠加前,先对相邻的列信号进行累乘预处理^[6]。然后根据相邻列信号之间不同的相关系数,对信号幅值进行非线性修正,得到非线性 SAFT 超声成像算法。

$$S(i, j) = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=-N+km}^{N-km} \left\{ \prod_{k=-n}^n \psi(\lambda \rho_{j,j+km}) \right\}$$

$$\cdot S\left(\frac{2R_{ij}}{c}, j+km\right)\phi(\mu\rho_{j,j+km})\} \quad (6)$$

公式(6)中 m 是累乘间隔, 他表示累乘时数据的间隔列数; $2n+1$ 是累乘列数, 表示累乘的列数。此处取 $m=n=1$, 表示把某一数据和它前一个数据及后一个数据相乘。 $\psi(\rho_{j,j+km})$ 和 $\phi(\rho_{j,j+km})$ 都是与相关系数有关的函数, 称之为非线性系数函数。对于非线性系数函数 $\psi(\rho_{j,j+km})$ 和 $\phi(\rho_{j,j+km})$, 要求当 $\rho_{j,j+km}$ 越大时, 其值越大, 即相关系数大时, 对信号进行增强; 当 $\rho_{j,j+km}$ 越小时, 其值越小, 即相关系数小时, 对信号进行抑制。

下面介绍 SAFT 超声成像系统, 以及采用基于不同非线性系数函数的 SAFT 算法对有机玻璃试块成像结果。

4 试验系统

4.1 试验系统组成

为了完成试验数据的采集、数据处理和图像重建, 建立了图 2 所示系统。



图 2 实验系统

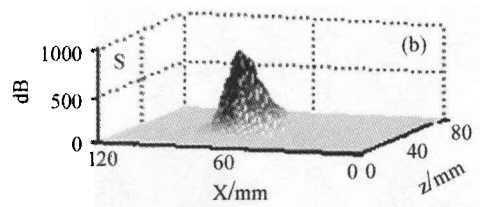
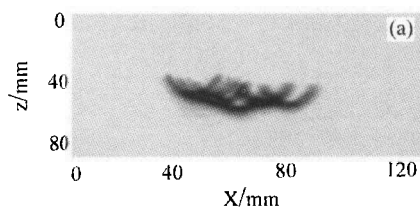


图 4 延时叠加 SAFT 图像 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

4.2 探头和试验试块

试验中采用的探头直径为 6mm, 中心频率为 5MHz。有机玻璃试块如图 3 所示, 在距检测面深度为 38mm 处有一排直径为 2.5mm 的横通孔, 它们之间的中心距依次为 4.5mm、5.5mm、6.5mm、8.5mm、10.5mm。试块的大小(长宽高)为: 120mm×32mm×80mm。

5 试验结果

对图 3 所示试块进行扫描成像, 横向扫描间距 Δx 为 2mm。得到的声学像全部以伪彩色图和网格图的形式给出。

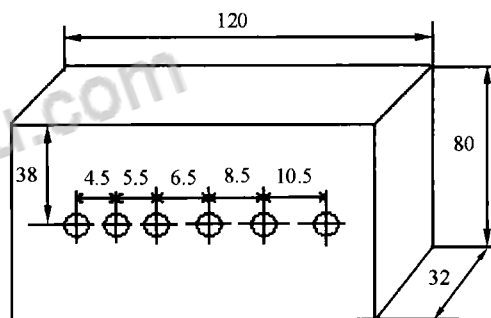


图 3 有机玻璃试块 单位(mm)

图 4 为时域 SAFT 图像, 可以看出, 图 4 的分辨率是很差的。而图 5、6、7、8、9 分别为采用基于不同的非线性系数函数的非线性 SAFT 算法所成的像。图 5 的分辨率较图 4 有所提高, 但是还不够理想。当改变非线性系数函数, 使 $\psi(x) = e^x$, $\phi(x) = 1$ 和 $\psi(x) = Xe^x$,

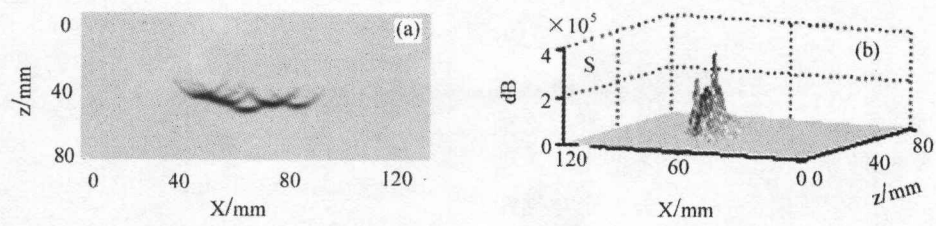


图 5 $\psi(x) = 1, \phi(x) = 1$ 时的非线性 SAFT 成像结果 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

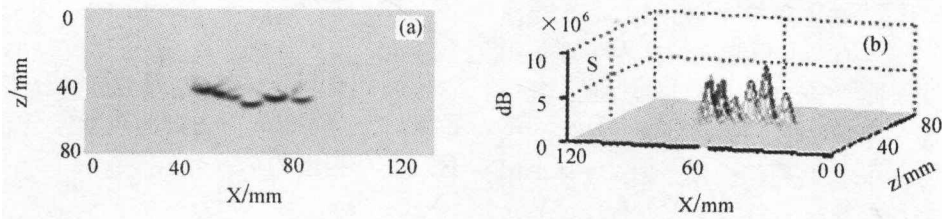


图 6 $\psi(x) = e^x, \phi(x) = 1$ 时的非线性 SAFT 成像结果 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

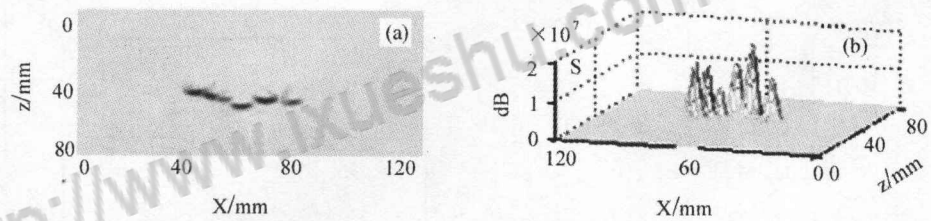


图 7 $\psi(x) = Xe^x, \phi(x) = 1$ 时的非线性 SAFT 成像结果 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

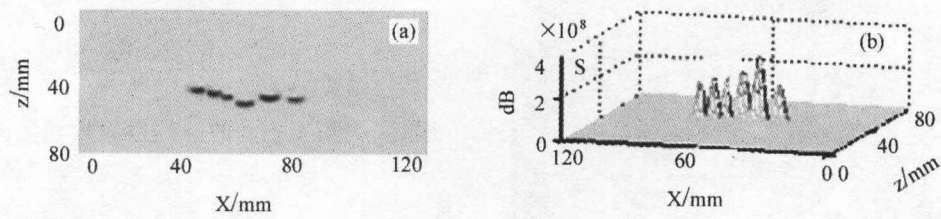


图 8 $\psi(x) = e^x, \phi(x) = X$ 时的非线性 SAFT 成像结果 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

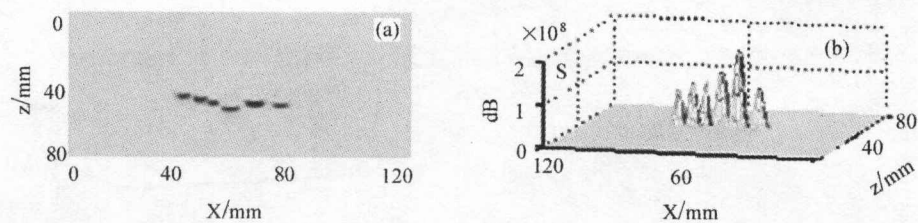


图 9 $\psi(x) = Xe^x, \phi(x) = X$ 时的非线性 SAFT 成像结果 (a) 伪彩色图 (b) 网格图

(下转第 30 页)

(1) 贝叶斯模型涉及的条件概率个数同特征、中间节点数目和贝叶斯网络结构有关,当贝叶斯网络规模较大时容易发生组合爆炸;而TBM模型的基本概率赋值只针对有限子集,能够有效避免这一问题;

(2) 贝叶斯模型中的贝叶斯网络结构、条件概率和TBM中的可靠性折扣都需要根据以往经验性结果得出,直接影响融合结论的有效性,如果这些数值选择不当,数据融合的效果甚至不如不采用数据融合的好;

(3) 由于贝叶斯模型可从输入先验概率直接到达结论的概率,更直观,容易控制,在确信不发生组合爆炸的情况下,贝叶斯模型更容易实现;

(4) 贝叶斯模型在缺少已知条件概率的情况下难以奏效;而TBM模型在缺少足够的条件概率的情况下,仍可以给出比较满意的结果。

根据本文的数据融合结果,我们认为采用数据融合方法利用多个特征对目标进行识别是

可行的,但需要根据问题的规模、能否得到足够的先验知识选择适当的数据融合方法,不能简单地认为哪种数据融合方法在任何情况下都优于另一种。

参 考 文 献

- 1 刘同明,夏祖勋,解洪成编著.数据融合技术及其应用.北京:国防工业出版社,1998.1-16.
- 2 Philippe Smets. What is Dempster-Shafer's model? In: Advances in the Dempster-Shafer Theory of Evidence, New York: Wiley, 1994. 5-34.
- 3 Philippe Smets. Data Fusion in the Transferable Belief Model. In: Proc. 3rd International Conference Information Fusion, France: Paris, 2000. 21-33.
- 4 Philippe Smets, Robert Kennes. Artificial Intelligence, 1994, 66(2): 191-234.
- 5 Nils J. Nilsson 著,郑扣根,庄越挺译,潘云鹤校. Artificial Intelligence A New Synthesis, 人工智能. 北京:机械工业出版社,2000.197-213.
- 6 张尧庭,陈汉峰编著.贝叶斯统计推断.北京:科学出版社,1991.1-16.
- 7 杨日杰.鱼雷报警声纳合成环境的研究.西北工业大学博士学位论文.西安,1999.11-43.

(上接第8页)

$\phi(x) = 1$ 时,如图6、图7所示,分辨率有很大提高.对于距离大于2mm的横通孔基本可以分辨出来.当进一步改变 $\psi(x)$ 和 $\phi(x)$,使 $\psi(x) = e^x$, $\phi(x) = x$ 和 $\psi(x) = Xe^x$, $\phi(x) = x$ 时,图像分辨率进一步提高,对于距离大于2mm的横通孔都可以很清晰地分辨出来。

6 结论

论文介绍了合成孔径聚焦超声成像的基本原理.同时,为了进一步提高成像系统分辨率,在合成孔径聚焦基本原理的基础上,设计了基于信号相关性分析的非线性SAFT算法.然后利用延时叠加SAFT超声成像算法和非线性SAFT超声成像算法对有机玻璃试块进行成像实验,实验结果表明:

与延时叠加SAFT成像算法相比,基于相

关性分析的非线性SAFT超声成像算法有效地提高了超声成像的分辨率,改善了图像质量,同时不同的非线性系数函数对成像结果也有较大的影响。

由基于信号相关性分析的非线性SAFT算法的设计理念,可以预见该算法会有一定抑制原始信号信噪比影响的能力。

参 考 文 献

- 1 孙宝申,沈建中.应用声学,1993,12(3):43-48.
- 2 Osetrov A V. Ultrasonics, 2000, (38): 739-744.
- 3 Chang Y F, Cheng-I H. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control, 2002, 49(6): 776-783.
- 4 孙宝申,张凡,沈建中.应用声学,1993,12(5):39-44.
- 5 朱勇华,邵淑彩,孙毓玉.应用数理统计.武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.310-336.
- 6 马兴瑞,陶良,黄文虎等.弹性波反演方法及其应用.北京:科学出版社,1999.359-375.



论文写作，论文降重，
论文格式排版，论文发表，
专业硕博团队，十年论文服务经验



SCI期刊发表，论文润色，
英文翻译，提供全流程发表支持
全程美籍资深编辑顾问贴心服务

免费论文查重：<http://free.paperyy.com>

3亿免费文献下载：<http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重：http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载：<http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. 颅外段颈动脉疾病筛查指南美国神经影像学学会多学科实践指南委员会向医疗卫生专业人员的声明血管和介入神经病学学会](#)
- [2. 颅外段颈动脉疾病筛查指南美国神经影像学学会多学科实践指南委员会向医疗卫生专业人员的声明血管和介入神经病学学会](#)
- [3. 焊缝散射对板中超声水平剪切导波直线合成孔径阵列成像的影响](#)
- [4. 合成孔径聚焦声成像时域算法研究](#)
- [5. 聚焦超声治肿瘤 无创安全痛苦小](#)
- [6. 战隼的新耳目——F-16C/D机载APG-68（V）9火控雷达的合成孔径模式成像试飞](#)
- [7. 一种新的机载单站无源定位方法](#)
- [8. 合成孔径聚焦超声成像\(二\)](#)
- [9. 基于合成孔径聚焦的超声SH导波成像检测](#)
- [10. 非线性超声医学成像的研究进展](#)
- [11. 合成孔径激光成像雷达中的非线性啁啾补偿](#)
- [12. 兔VX2肝癌高能聚焦超声治疗后的磁共振灌注加权成像](#)
- [13. 合成孔径声纳中RD和 \$\omega\$ -k成像算法的比较](#)
- [14. 聚焦换能器的研制和在超声特征成像中的应用](#)
- [15. 光纤透镜的光学原理与应用](#)
- [16. 基于合成孔径聚焦技术的混凝土断面二维成像方法研究](#)

- [17. 合成孔径声纳成像聚焦问题的研究](#)
- [18. 合成孔径聚焦成像算法研究](#)
- [19. 快速后向投影合成孔径雷达成像的自聚焦方法](#)
- [20. 高强度聚焦超声软组织损伤超声监控成像与评价方法](#)
- [21. 超声逆散射成像问题中的截断完全最小二乘法](#)
- [22. 合成孔径激光成像雷达中非线性啁啾补偿算法的误差分析](#)
- [23. 超声弹性成像对高强度聚焦超声肿瘤治疗的疗效评价](#)
- [24. 基于不同相控聚焦模式的非线性超声阵列成像方法研究](#)
- [25. 聚焦超声声场中的散射体成像方法](#)
- [26. 超声逆散射成像问题中的正则化方法研究](#)
- [27. 非线性\(声\)参数及其在超声成像中的应用](#)
- [28. 新型超声造影非线性成像技术](#)
- [29. 数字双波束合成孔径超声成像方法的研究与实现](#)
- [30. 冲激信号SAR反向投影成像方法I、Q实现](#)
- [31. 基于波束仿真的合成孔径聚焦成像研究](#)
- [32. 高能聚焦超声无损伤肿瘤治疗仪的研究](#)
- [33. 基于非线性CSA的合成孔径雷达成像及问题](#)
- [34. 切变平均自聚焦算法在合成孔径声纳成像中的应用](#)
- [35. 基于多DSP系统实现的非聚焦合成孔径实时成像处理](#)
- [36. 超声内窥合成孔径成像技术的研究](#)
- [37. 一种基于FPGA的数字超声电子聚焦系统的设计](#)
- [38. 聚焦超声高温热疗在治疗实体瘤方面的临床研究](#)
- [39. 非线性超声造影成像研究进展](#)
- [40. Normal mode wave-number estimation using horizontal synthetic aperture array](#)
- [41. 超声层析成像中的一种非线性反演方法](#)
- [42. 医学超声工程研究新进展](#)
- [43. 高强度聚焦超声治疗胰腺癌的计量与疗效研究](#)
- [44. 基于空间广义相干系数加权的医学合成孔径超声成像](#)
- [45. 高能聚焦超声治疗兔V X 2肝癌后的磁共振灌注加权成像的成像技术及特征](#)
- [46. 中国批准首个进口聚焦超声肿瘤治疗仪](#)
- [47. 高强度聚焦超声软组织损伤超声监控成像与评价方法](#)
- [48. 高能聚焦超声治疗后兔肝VX2种植瘤~1H-MRS成像特点](#)
- [49. 合成孔径聚焦超声成像\(三\)](#)
- [50. 基于Golay-3空间成像光学系统的焦深分析](#)