

YIXUE CHAOSHENG

HECHENG KONGJING CHENGXIANG JI TANXING CHENGXIANG DE
YOUHUA JISHU YANJIU

医学超声

合成孔径成像及弹性成像的 优化技术研究

张志宏 张丛耀 叶 晖 黎梨苗 刘志雄·著



电子科技大学出版社

YIXUE CHAOSHENG
HECHENG KONGJING CHENGXIANG JI TANXING CHENGXIANG DE
YOUHUA JISHU YANJIU

医学超声

合成孔径成像及弹性成像的
优化技术研究

张志宏 张丛耀 叶 晖 黎梨苗 刘志雄·著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医学超声合成孔径成像及弹性成像的优化技术研究 /
张志宏等著. —成都: 电子科技大学出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5647-4631-5

I. ①医… II. ①张… III. ①超声波诊断—超声成像
—最优化算法—研究 IV. ①R445.1②O426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124141 号

医学超声合成孔径成像及弹性成像的优化技术研究

张志宏 张丛耀 叶 晖 黎梨苗 刘志雄 著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产
业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 李述娜

责任编辑: 卢 莉

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸: 140 mm × 203mm 印张 7.25 字数 195 千字

版 次: 2017 年 6 月第一版

印 次: 2017 年 6 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-4631-5

定 价: 28.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

医学超声成像的发展与微电子技术和数字信号处理的发展密切相关。随着微电子技术和数字信号处理的迅速发展，医学超声成像技术获得了多次革命性的进步。到目前为止，超声成像技术、核磁共振成像技术和 X 射线断层扫描成像技术已经并列成为当今三大医学成像技术。因为超声对人体组织的无损伤性和无辐射性，使得超声成像技术广泛应用于临床诊断中：乳腺癌检测、肝硬化检测、皮肤癌检测和胎儿检测等。

斑点噪声抑制和弹性成像优化研究是医学超声诊断技术中的重要课题，此课题不仅具有重要的理论意义，更具有实际的使用价值。本书针对这两个课题，对医疗超声诊断技术展开研究。

斑点噪声是影响超声成像品质的重要原因。由于人体组织内分布着各种微小颗粒，超声波在传播过程中发生散射，生成若干条相干子波。相干子波又发生干涉，造成声强在某些区域始终加强，而在有些区域始终减弱，产生干涉条纹。这种条纹在超声领域被称为斑点噪声。斑点噪声存在于成像图的整个区域，降低了图像信噪比，掩盖某些细小的组织信息，影响临床诊断的准确性。

超声合成孔径聚焦成像（Synthetic Aperture Imaging）可以追溯到 20 世纪 50 年代发展起来的合成孔径雷达技术，是一种比较有潜力的成像方法。通过点源传感器在被测物理的表面上扫描，接收来自物体内部各点的散射声信号并加以存储，然后对不同接收位置上传感器接收的声信号引入适当的延迟并进行叠加，以获得被成像区域的逐点聚焦声学成像。与传统的超声成像方法不同，合成孔径聚焦成像可以通过较低的工作频率和较小的传感器孔径获得较好的分辨率。波束形成在整个超声成像系统中处于核心位

置,对成像质量起着决定性的作用。波束形成研究中有两个主要指标,即主瓣宽度和旁瓣幅度,它们在理论上作为主要标准来判断所形成的波束质量的高低。主瓣的宽度越窄,那么成像的横向分辨率越高;旁瓣的幅度越小,那么成像的对比度就越大,并且伪影噪声越少。在现代超声延时叠加波束形成中,常使用动态聚焦和幅度变迹来控制旁瓣的幅度和主瓣的宽度。动态聚焦效果是使每条扫描线上的点都能够被聚焦;而幅度变迹则是施加不同的权值在不同的阵元接收到的信号上,通常为 Hanning 函数、Blackman 函数。然而在实际应用中,发射动态聚焦是无法实现的。因为超声成像其实就是对区域进行逐点聚焦,而声束的传播是需要时间的,如果对区域内每个点进行发射聚焦的话,那必须花费大量的时间。根据相互定理,接收聚焦的原理就相当于阵元发射的超声信号经过延迟处理的场点聚焦,所以现今,延迟叠加波束形成一般指的就是接收聚焦。从另外一种角度上来说,接收聚焦能够在一定程度上满足超声成像的要求。但是接收聚焦要对区域内所有点进行处理,这样对超声探测的硬件要求会比较高,首先必须对区域内所有点的延迟时间进行计算并加持在超声探头上,这样也会耗费大量的时间,其次成像的深度很大程度上限制了成像的分辨率和探测深度。

通过对国内外斑点抑制算法的深入研究和比较,本文提出了基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法、基于空间滤波的超声合成孔径空间复合成像算法和基于合成孔径连续波束形成的空间复合去噪算法,并且对这三种算法进行仿真实验,讨论了它们在超声成像系统中的可行性,主要内容如下。

(1) 斑点噪声是由波的干涉和散射造成,即不同的波束会产生不同的斑点噪声。常见的斑点噪声抑制算法通过改变扫描方式(角度、频率等)获取一组斑点噪声解相关的信号。通过对这组信号进行非相干平均,达到抑制斑点噪声的效果。这些算法需要重

复发射改变扫描方式后的波束，降低了帧率，损失了成像的时间分辨率。针对此缺点，本文提出了基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法，该算法通过对回波信号进行滤波，得到不同接收方向的子带信号。而后对子带信号分别成像及复合，从而抑制斑点噪声。通过对弹性成像和兽用超声 B 模式的实验结果的分析，证明新算法在不降低成像时间分辨率的情况下，有效抑制了弹性成像和 B 模式中的斑点噪声。

(2) 原始合成孔径空间复合成像技术是通过单阵元发射，全阵元接收的方式得到没有经过聚焦的原始信号，再对原始信号分别进行不同的角度的聚焦，从而形成不同的子图像。在聚焦过程中，单一的使用 Hanning 窗作为变迹函数，并没有考虑到采样点和发射/接收探头之间的方向性问题。在第 3 章，本文提出了一种基于空间滤波的合成孔径成像算法，提高了成像的探测深度，信噪比和对比度。但是图像始终受到斑点噪声的影响，所以，本文结合空间复合成像技术的优势，提出了一种基于空间滤波的超声合成孔径空间复合成像算法。通过阵元接收到信号后，对信号进行不同角度的聚焦，形成多幅不同角度的成像，再对这些结果进行加权复合，使得斑点噪声得到抑制，成像信噪比和对比度噪声比得到提高，从而改善了成像的品质。

(3) 常见的复合去噪算法降低了成像图的空间分辨率。本文利用合成孔径技术成像空间分辨率高的特点，提出了基于合成孔径连续波束形成的空间复合去噪算法。在合成孔径波束形成的第一阶段，接收和存储不同角度的子孔径的回波信号。通过对子孔径信号分别进行波束形成，生成一组低分辨率成像图。对这组低分辨率图分别进行第二阶段波束形成，生成一组具有斑点噪声解相关的高分辨率成像图。最后通过对这组高分辨率图的非相干平均，来抑制斑点噪声。相比基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法，新的算法没有在滤波时损失带宽；相比其他复合去噪算法，

新的算法在达到抑制斑点噪声的同时,提高了图像的空间分辨率。

超声弹性成像系统在临床应用中有着非常重要的价值,但是成像品质被很多的因素所影响,例如:探测深度,位移误差,分辨率和应变噪声。在学术界,已经有很多种优化技术被提出,其中包括有:对数幅度压缩,该方法的目的主要是用于位移估计误差的抑制;幅度调制修正,该方法的目的主要是用于应变准确度的提高。还有很多学者通过改进已有的在超声领域的图像处理技术,其中包括有:发送端频率复合技术、接收端频率复合技术、编码激励技术和空间复合技术等。本文对弹性成像的噪声抑制和空间分辨率进行了研究,提出了一种基于发送端多频率和编码激励的复合技术,并对其进行仿真和体模实验,讨论和分析了该算法在超声弹性成像系统的可行性,主要内容如下。

(1) 本书首先对接收端频率复合技术和编码激励技术在弹性成像的应用上进行了理论分析。频率复合技术,是根据不同中心频率的超声波具有不同噪声图像和不同波长的特性,从而得到信号的解相关性,并利用这个特性来达到噪声抑制的目的。超声编码发射技术可以提高信号的发射能量,但是并不增加发射信号功率。在接收到经过编码以后的回波信号,借助匹配滤波对其处理,从而提高回波信号的信噪比,并使得整个目标区域的成像质量有所提高。因为回波信号被波束合成等因素影响和不完全解码而使得旁瓣不能够完全被消除,所以新的噪声可能会因为编码激励技术而产生。发送端频率复合技术主要的过程是在多幅应变图生成以后再进行抑噪处理,所以在技术的流程上,编码激励技术和频率复合技术是没有冲突的。本书从流程结合和抑噪原理来分析,发送端频率复合技术可以辅助编码激励技术成像。首先由不同中心频率编码信号激励产生不同的子应变图,因为各子应变都会存在一定的相关性,所以可以对这些子应变图像进行加权复合。然后通过应变噪声的解相关性,使编码激励引入的新噪声和应

变噪声得到更大的抑制，这样不仅能提升图像的质量，并且还加强了应变检测的能力和探测深度。本文提出了一种基于发送端多频率编码激励的弹性成像优化技术，并进行对比实验。从实验结果中证明了，结合编码激励和发射端频率复合技术的优点，能够使得斑点噪声得到抑制，成像信噪比和对比度噪声比得到提高，并且还可以改善弹性成像的远场成像的品质。

(2) 编码激励系统，发射时对长脉冲进行编码，接收时将长脉冲解码为短脉冲，在不降低空间分辨率的情况下，增加了波束的平均声功率。因此，编码激励成像系统可以在距离探测表面较深的区域，获得较好的信噪比。本文提出的基于编码激励和空间复合的弹性成像优化算法，综合了编码激励和基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法的优点。实验结果表明，算法相比原始和单纯使用空间复合的成像图，具有更高的信噪比和对比信噪比，尤其改善了远场的成像品质，并降低了远场出现的弹性成像计算错误。

(3) 位移估计在弹性成像中起关键作用。在静态/准静态压缩弹性成像技术中，零相位位移估计算法 (Phase Zero Algorithm, PZA) 是最常见的位移估计算法。该算法假设介质中物体只发生刚性形变，即只在外力施加方向上存在位移。通过计算压缩前后两帧扫描线在轴向窗口的互相关最大值，对位移进行估计。但该假设在临床实验中往往不能得到保障，尤其是徒手压缩量比较大时，介质中的物体会发生横向的变形和移动。在此情况下，零相位位移估计算法容易出现位移估算错误。本书提出基于迭代初始优化的二维零相位位移估计算法，将原始算法计算初始值的窗口由一维扩展至二维，并对迭代初始值进行筛选和优化。经实验表明，该算法可以有效地减少位移估计的错误，改善弹性成像品质。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 主要研究方向与内容	4
1.3 论文结构	7
第 2 章 医学超声成像	9
2.1 超声 B 模式成像	9
2.1.1 波束形成	9
2.1.2 波束控制方法	12
2.1.3 回波信号处理	16
2.2 超声合成孔径成像	19
2.2.1 合成孔径技术概述	19
2.2.2 波束形成	21
2.2.3 波束控制	39
2.3 超声弹性成像	42
2.3.1 超声弹性成像简述	42
2.3.2 静态/准静态压缩弹性成像技术	44
2.4 超声成像性能评估	48
2.4.1 斑点噪声特征分析	48
2.4.2 B 模式性能评价	51
2.4.3 弹性成像性能评价	51
2.4.4 提高成像性能的相关方法	53
2.5 本章总结	54

第 3 章 基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法	55
3.1 算法设计	55
3.1.1 理论基础及流程设计	55
3.1.2 子图相关性与成像品质分析	57
3.1.3 滤波器组设计	59
3.2 算法在弹性成像模式中的实验及分析	61
3.2.1 实验平台	61
3.2.2 实验过程及分析	63
3.3 算法在 B 模式中的实验及分析	71
3.3.1 实验平台	71
3.3.2 实验过程及分析	73
3.4 本章总结	78
第 4 章 基于空间滤波的超声合成孔径空间复合成像算法	80
4.1 理论基础	80
4.1.1 空间复合成像技术	80
4.1.2 原始合成孔径空间复合成像	82
4.2 算法设计	84
4.3 实验与结果分析	86
4.3.1 实验平台	86
4.3.2 结果对比与分析	87
4.4 本章总结	92
第 5 章 基于合成孔径连续波束形成的空间复合去噪算法	94
5.1 算法设计	94
5.1.1 理论基础	94
5.1.2 虚拟阵元	95
5.1.3 合成孔径的连续波束形成	95
5.2 算法流程	99
5.3 参数选择	101

5.4	实验及分析	116
5.4.1	仿真平台	116
5.4.2	实验过程及分析	117
5.5	总结	122
第 6 章	基于编码激励与频率复合技术的弹性成像研究	124
6.1	理论基础	124
6.1.1	频率复合技术在弹性成像的研究	124
6.1.2	编码激励技术在弹性成像的研究	130
6.2	算法设计	139
6.3	实验与结果分析	145
6.3.1	实验平台	145
6.3.2	结果对比与分析	148
6.4	本章总结	157
第 7 章	基于编码激励和空间复合的弹性成像优化算法	159
7.1	理论基础	159
7.1.1	编码激励原理	159
7.1.2	Chirp 编码激励	162
7.2	算法流程	164
7.3	实验及分析	166
7.3.1	实验一	167
7.3.2	实验二	172
7.4	总结	177
第 8 章	基于迭代初始值优化的二维零相位位移估计算法 (方法一)	178
8.1	理论基础	178
8.2	算法设计	179
8.3	实验及分析	182
8.4	总结	189

第 9 章 基于迭代初始值优化的二维零相位位移估计算法	
(方法二)	191
9.1 引言	191
9.2 算法设计	191
9.2.1 算法流程	191
9.2.2 阈值分析	193
9.3 实验及分析	196
9.4 总结	200
第 10 章 总结与展望	201
参考文献	202
主要研究成果	217
攻读博士学位期间参与的四川大学科研项目	219

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景与意义

从 1920 年开始,学术界已经开始了超声成像的研究。苏联著名科学家 Splplov S.J.对超声成像进行了近 20 年的研究,他在 1935 年设计了液面成像装置,在声学界拥有着非常大的贡献。然而由于软硬件方面的种种技术原因,使得超声成像的研究进展变得缓慢。在 20 世纪 60 年代末,超声成像的研究重新获得生机,因为电子技术、计算机技术和信号处理的快速发展,使得限制超声发展的因素得以克服。从 20 世纪 70 年代开始,超声成像的研究取得了重大成果,几个较成熟的成像方法逐渐形成,并广泛应用于医学超声诊断中。

医学超声成像的发展与微电子技术和数字信号处理的发展非常密切。随着微电子技术和数字信号处理的迅速发展,医学超声成像技术获得了多次革命性的进步。到目前为止,超声成像技术、核磁共振成像技术和 X 射线断层扫描成像技术已经并列成为当今三大医学成像技术。因为超声对人体组织的无损伤性和无辐射性,使得超声成像技术广泛应用于临床诊断中:乳腺癌检测、肝硬化检测、皮肤癌检测和胎儿检测等。

超声成像系统是通过发射超声波进行入人体,然后接收从人体反射回来的信号,这些信号包含有人体组织的特征信息,利用信号的特性来获得人体组织的影像。如图 1-1 所示,超声换能器即探头既作为发射器又作为接收器。当探头发射信号时,利用压

电效应把高频电磁振动的能量转换成机械振动的能量，从而完成超声波的发射过程；在接收信号时，探头完成机械振动与电磁振动能量之间的转换，在经过适当的信号处理，得到从人体反射回来的回波信号。具体的超声成像流程如下：因为人体组织的不同，超声波在进入人体之后，会发生组织的折射、反射和吸收等物理现象；在反射的回波信号被探头接收后，经过一系列的信号处理（直流去除、正交解调和解调提取等）后，通过扫描转换器和噪声抑制等图像处理技术，使人体的组织的信息在屏幕上显示。

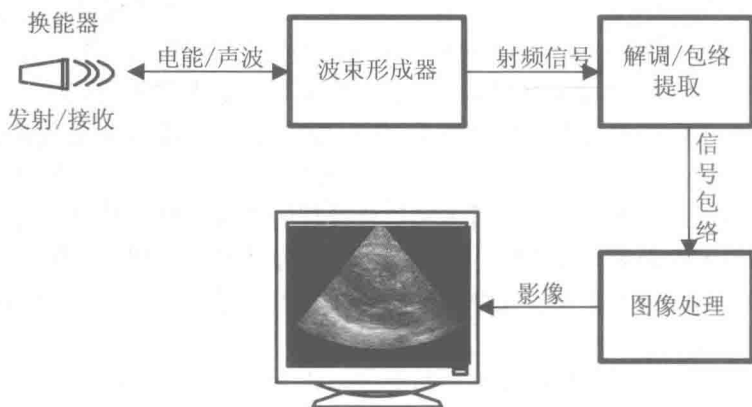


图 1-1 超声成像系统架构

超声扫描成像方法主要有两个大类五小类：A 型（Amplitude Mode）、B 型（Brightness Mode）、M 型（Motion Mode）、D 型（Doppler Mode）及 C 型（Doppler Color Flow Mapping CFM）。

A 型超声诊断法为振幅调制型，它根据有无反射波、反射波的距离及波幅的高低、大小及形状来进行诊断。由于 A 型超声诊断法的局限性，发展出了另外一种方法，B 型超声诊断法。B 型超声诊断法又称为灰度调制型，是在 A 型超声诊断基础上发展起来的一种灰度调试性方法。B 型诊断法的工作原理基本与 A 型诊

断法相同，都是利用回波原理作为诊断的依据，但是 B 型诊断法在屏幕上显示的是直观二维切面图像。M 型诊断法为活动显示型，亦称为超声心动图，主要用于心脏和胎心等的检查，不适宜于静态脏器的检查。C 型又称为彩色多普勒血流显像，即通常所说的彩超，主要用于检测心脏及血管内的血流动力学状态。D 型超声诊断法又称差频示波型，在检测心脏及血管的血流动力学状态方面得到广泛应用，特别在先天性心脏病和瓣膜病的分流及反流的应用中取得非常好的效果。

随着超声诊断技术的不断发展，除了上述几种超声诊断方法外，出现了一些新颖的超声成像方法：合成孔径成像、弹性成像、非线性血流成像、组织谐波成像和三维超声成像等。超声诊断的一个缺点就是容易受到噪声的干扰，并且时间分辨率和空间分辨率相对较低，一定程度上依赖硬件和软件。在雷达系统中，最早应用了合成孔径技术。合成孔径的基本原理：使天线平台在不同的位置发射脉冲，并且这些不同的位置看作是阵列天线的阵元位置，通过将这些在不同位置发射的脉冲回波信号与阵元位置结合起来，形成一个大孔径天线平台，从而使得方向位分辨率得到提高。人体的组织可以看作是由许多微小颗粒构成，当超声波进入人体组织时，则会发生散射，这些散射波相互产生干涉效应，从而导致斑点噪声的出现。斑点噪声的出现使得图像的信噪比降低，在一定程度上影响了临床诊断。甚至在大型的超声诊断中，为了要达到高帧率和高空间分辨率，对硬件和软件的要求都比较高。所以，利用合成孔径成像技术有效地提高成像的品质是本书的研究方向之一。

据统计，乳腺癌已经成为威胁现代女性健康的重要问题，病发率和死亡率分别高达 32% 和 15%。目前，随着超声弹性成像技术的出现，虽然乳腺癌的发病率居高不下，但是死亡率却有效得到抑制。超声弹性成像作为近些年发展起来的新技术，其在研究

中已经表明,作为一种乳腺癌早期诊断方法,其在控制乳腺癌死亡率上起到了至关重要的作用。通过资料显示,乳腺的原位癌是完全可以被治愈的,I期乳腺癌治愈率为97%。由此可知,乳腺癌的早期诊断,在很大程度上能降低乳腺癌患者的死亡率。但有资料显示,对一些硬度较大的良性肿块,超声弹性成像技术有可能造成误诊;而且因为该技术的精确度的局限,也探测不到一些纤维腺瘤。所以,如何使得弹性成像的图像品质得到提升,并提高成像的准确性,是一个非常具有研究价值和使用价值的课题。本文也对超声弹性成像进行了研究分析。

1.2 主要研究方向与内容

本书针对超声成像时间分辨率和探测深度的提高、斑点噪声抑制和弹性成像优化六个重要课题进行了理论研究和实验分析,并且提出6个具有创新性的方法。

1. 基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法。
2. 基于空间滤波的超声合成孔径空间复合成像算法。
3. 基于合成孔径连续波束形成的空间复合去噪算法。
4. 基于编码激励和频率复合的弹性成像优化算法。
5. 基于编码激励和空间复合的弹性成像优化算法。
6. 基于迭代初始值优化的二维零相位位移估计算法(根据迭代初始值筛选模型的不同,分为方法一和方法二)。

以下对六种算法进行简单的概述。

(1) 常见的复合算法,需要重复发射不同方向或频率的脉冲信号,降低了成像时间分辨率。本文提出一种基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法,通过对回波信号进行滤波,获取一组包含斑点噪声解相关的子带信号,最后通过对子带信号的分别成像和复合,在不降低帧率的情况下,达到抑制了弹性成像模式和B

模式中的两类斑点噪声的目标。算法在两种超声成像模式中进行实验：在弹性成像模式的实验结果表明，算法可以有效抑制弹性成像模式的斑点噪声，并强化了目标硬块组织信息。在兽用超声 B 模式的实验结果表明，算法可以有效抑制 B 模式图像中的斑点噪声，并凸显了细小的组织纹理信息。

(2) 原始合孔径空间复合成像算法是通过单阵元发射，全阵元接收的方式得到没有经过聚焦的原始信号，再对原始信号分别进行不同的角度的聚焦，从而形成不同的子图像。在聚焦过程中，并没有考虑到采样点和发射/接收阵元之间的方向性问题。在第 3 章，本文提出了一种基于空间滤波的超声合成孔径成像算法，提高了成像的探测深度、信噪比和对比度。但是图像始终受到斑点噪声的影响，所以，本文结合空间复合去噪技术的优势，提出了一种基于空间滤波的超声合成孔径空间复合成像算法。通过阵元接收到信号后，计算出各个点的聚焦的权重系数，对信号进行不同角度的聚焦，形成多幅不同角度的成像，再对这些结果进行加权复合，使得斑点噪声得到抑制，成像信噪比和对比度噪声比得到提高，改善成像的品质。

(3) 基于滤波器组的接收端空间复合去噪算法在滤波中损失了带宽，常见的复合算法会降低成像图的空间分辨率。本文提出基于合成孔径连续波束形成的空间复合去噪算法，在连续波束形成的第一阶段接收和存储不同角度子孔径的回波信号，然后进行分别成像和复合，以达到在有效抑制斑点噪声、提升时间分辨率的同时，不损失信号带宽，并提升成像图像空间分辨率的目标。

(4) 因为回波信号被波束合成，以及不完全解码使得旁瓣不能够完全被消除等因素影响，所以新的噪声可能会因为编码激励技术而产生。由于发送端频率复合技术主要的过程是在多幅应变图生成以后再进行抑噪处理的，所以在技术的流程上，编码激励和频率复合技术是没有冲突的。本书从流程结合和抑噪原理来分