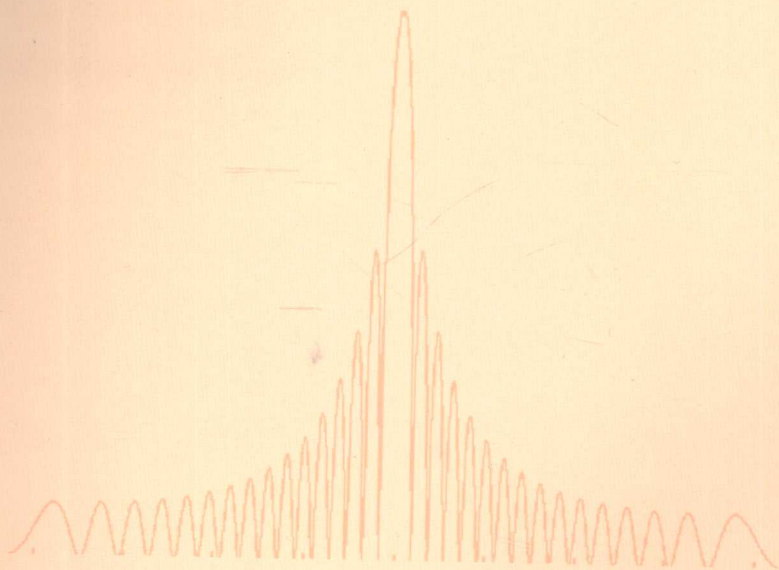




# 超声成像算法导论

► 彭 虎 编著



中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学 **精品** 教材

# 超声成像算法导论

CHAOSHENG CHENGXIANG SUANFA DAOLUN

彭 虎 编著

中国科学技术大学出版社

## 内 容 简 介

本书以数学物理方法和线性系统理论为基础,比较详细地介绍了超声成像原理和算法。

全书分为四个部分。第一部分是基础理论,包括线性系统理论在成像中的应用、有关波动方程的数学物理方法、波的传播与衍射原理;第二部分是成像模型及其算法实现,包括动态聚焦超声成像模型、基于非衍射波的 Fourier 超声成像模型、基于角谱传播原理的 Fourier 超声成像模型、宽频带超声成像模型、任意声场下的 Fourier 成像模型等;第三部分为合成孔径成像方法,包括合成聚焦成像、多阵元合成孔径聚焦成像、合成接收孔径成像、合成发射孔径成像等;最后一部分介绍超声编码发射技术在成像系统中的应用。

本书可供生物医学工程专业的本科生和研究生使用,亦可供从事其他领域超声成像检测技术的研究人员参考。

本书部分内容受国家自然科学基金项目(60471057)资助。

## 图书在版编目(CIP)数据

超声成像算法导论/彭虎编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2008.10

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02172-5

I. 超… II. 彭… III. 超声成像—算法—高等学校—教材 IV. O426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 157543 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:11 插页:2 字数:209 千

2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册

定价:20.00 元





## 前 言

1949年奥地利学者 K. T. Dussik 利用超声脉冲波对脑部疾病进行了成功的诊断,开超声成像理论和技术之先河。通过半个世纪科学家和工程师的努力,现代的超声成像仪已广泛应用于临床医学诊断,它可以获得器官的任意断面图像,还可观察运动器官的活动情况。超声影像诊断无痛苦与危险,属于非损伤性检查。与 X 射线影像诊断相比,它具有无辐射、价格低、使用方便等优势。基于这些突出的性能,超声影像诊断成为医学成像领域中颇具生命力的现代诊断技术。

在我国,有关超声成像的书籍不多,而且绝大部分书籍主要涉及超声图谱及其医学方面的诊断,还有一小部分是关于超声成像原理介绍和系统设计。对超声成像最关键的算法问题几乎没有什么书籍进行系统的介绍。而现代的超声成像算法不仅决定了系统的结构,决定了系统的工作方式,而且决定了系统的成像质量,决定了仪器的成本和市场效益。可以认为,谁掌握了新的高效率的成像算法,谁就能在超声成像研发领域占有一席之地。

本书的目的就是提供给读者常用的超声成像算法,涵盖了目前在超声成像领域中广泛采用的合成孔径成像算法,超声编码发射成像技术,以及一种新的成像理论——Fourier 超声成像。本书的特点就是以数学物理为理论基础,以线性系统为工具,以 Fourier 变换为手段,对超声成像进行理论探讨和建模。本书理论严谨,逻辑性强,内容新颖,启发性高。书中所涉及的许多内容都是作者近十年来研究工作的结晶。希望读者通过对本书的学习,能够从理论的角度去分析成像原理,建立成像系统,探讨提高成像质量的途径。

毫无疑问,大量国内外同行研究的文献和作者所在实验室的成果为本书的编著提供了很好的素材。感谢本书中所引用文献的作者,感谢研究生杜春宁、韩雪梅为本书部分资料收集和验证所做的工作,感谢为本书的完成提出许多宝贵建议的吴华宝老师。

# 目 次

总序 .....	( i )
前言 .....	( iii )
<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>( 1 )</b>
1.1 医学超声成像发展历史 .....	( 1 )
1.2 国内外研究进展 .....	( 3 )
1.2.1 数字化成像 .....	( 4 )
1.2.2 谐波成像 .....	( 5 )
1.2.3 超声体成像 .....	( 6 )
1.2.4 组织弹性成像 .....	( 6 )
1.2.5 合成孔径成像 .....	( 7 )
1.2.6 Fourier 成像系统 .....	( 7 )
1.3 本书内容安排 .....	( 8 )
<b>第 2 章 超声成像中的线性系统理论</b> .....	<b>( 10 )</b>
2.1 Fourier 变换性质及其应用 .....	( 10 )
2.1.1 Fourier 变换 .....	( 11 )
2.1.2 性质 .....	( 14 )
2.2 一个一维成像的例子 .....	( 15 )
2.2.1 目标建模 .....	( 16 )
2.2.2 系统建模 .....	( 16 )
2.2.3 逆问题求解 .....	( 17 )
2.3 匹配滤波器 .....	( 19 )
2.4 带通信号的相干处理 .....	( 21 )
2.5 时域中的 Doppler 现象 .....	( 24 )
2.5.1 系统模型 .....	( 24 )
2.5.2 逆问题求解 .....	( 26 )
2.5.3 分辨率 .....	( 28 )
<b>第 3 章 数学物理方程基础知识</b> .....	<b>( 31 )</b>
3.1 几种常见的数学物理方程 .....	( 31 )





5.3.1	成像模型	( 89 )
5.3.2	实现和仿真	( 91 )
5.3.3	讨论	( 93 )
5.4	基于 Fourier 变换的高质量超声成像	( 94 )
5.4.1	成像建模	( 94 )
5.4.2	有限次发射模式下的 HFR 成像仿真	( 96 )
5.4.3	讨论	( 99 )
5.5	任意辐射场下的 Fourier 成像建模	( 99 )
5.5.1	理论建模	(100)
5.5.2	理论分析	(101)
5.5.3	仿真结果	(103)
5.5.4	讨论	(105)
5.6	圆柱型传感器下的 Fourier 成像	(105)
5.6.1	传感器结构与声场	(106)
5.6.2	系统模型	(106)
5.6.3	仿真结果	(110)
5.6.4	讨论	(112)
<b>第 6 章</b>	<b>合成孔径成像</b>	<b>(113)</b>
6.1	延时叠加波束形成算法	(114)
6.1.1	聚焦偏转延时计算	(115)
6.1.2	波束仿真	(116)
6.2	波束控制方法	(118)
6.2.1	动态聚焦	(118)
6.2.2	幅度变迹	(119)
6.2.3	动态孔径	(120)
6.3	合成孔径成像	(122)
6.3.1	合成孔径聚焦	(123)
6.3.2	多阵元合成孔径聚焦	(126)
6.3.3	合成接收孔径	(128)
6.3.4	合成聚焦	(130)
6.3.5	合成发射孔径	(132)
6.4	实验设计	(135)
6.4.1	实验对比与分析	(136)



# 第 1 章 绪 论

具有不同密度、不同声速等理化特性的生物组织器官,对外来的超声波能量将产生反射、透射、散射、衰减和非线性参量等物理效应,运动组织还将产生 Doppler 效应,提取、分析或显示这些生物组织被超声波作用后的信息,就可以观察生物组织的内在特性。医学超声成像,就是以超声波作为被探测信息的载体,利用电子信息学、计算机图像处理等技术手段,提取超声回波传递的生物内部信息,对生物组织器官进行成像。

## 1.1 医学超声成像发展历史

声学是物理学中的一个重要部分,而超声学是声学中的一个分支学科。超声学的发展还只是 19 世纪末 20 世纪初的事,它的迅速发展不仅是物理学发展的结果,也是工业、军事上迫切需要的结果。1912 年发生了一出震惊世界的大悲剧,英国客轮泰坦尼克号(Titanic)在北美海岸附近与冰山相撞沉没,几乎所有乘客都葬身海底,这激起了人们在视度不良的情况下,发现水下或水上障碍物的强烈愿望。

1917 年,法国科学家 Langevin 发现反压电效应,他用高频电磁场加在石英片上获得超声,提出了用超声在水下做探测的“水下定位法”,从此开始了超声检测的时代。1928 年,Dunn 等研究了超声的生物效应,在德国申报了超声治疗机的专利,但是直到 1939 年才出现了超声治疗坐骨神经痛获得良好结果的报告,可见超声治疗学是超声生物医学中最先发展的领域。

1928 年,Sokolov 叙述了超声探测金属中裂隙的方法。1942 年,Dussik 和 Firestone 首先把超声工业探伤原理引用到医学诊断中,用连续波超声来诊断颅脑



声诊断心脏房、室间隔缺损的文章。但由于条件限制,未能推出实用的诊断仪器。1982年,美国的 Bornner 和日本的 Namekawa、Kasai 最先研制成功了该技术。同一年,第一台彩色 Doppler 血流显像仪由日本 Aloka 推出。彩色 Doppler 血流成像是一种能同时显示 B 型图像和 Doppler 血流数据(血流方向、流速、流速分散)的双重超声扫描系统,它对采样容积内 Doppler 血流信号的血流方向、流速、流速分散进行采样并将它们彩色编码后给予显示。超声 Doppler 使超声诊断从形态学过渡到血液动力学,同时获得人体解剖信息和功能信息。

从 20 世纪 70 年代到 90 年代,多阵元超声传感器技术、数字扫描转换技术、超声 Doppler 检测技术、数字声束形成技术等重要研究的突破,有力地促进了医学超声诊断仪的发展,促进了医学超声图像诊断的蓬勃发展和深入应用。当前,医学超声成像技术与 X 射线诊断技术、同位素辐射诊断技术一起被公认为现代三大医学影像技术,三足鼎立,成为现代医学影像技术中不可替代的支柱。

和其他成像技术相比,超声成像的优势在于:

- (1) 相对安全,不需要电离辐射;
- (2) 无创,大多数检测不会使病人痛苦;
- (3) 不像 X 射线、CT 和 MRI 那样需要特殊的设备,便携式超声扫描仪在野外也可进行超声诊断;
- (4) 实时显示能力,能够实时显示器官的运动功能。

超声成像虽然有上述优点,但由于其工作模式、成像理论多年来都未有新的突破,当前的超声成像仪还有很多问题值得研究。比如:帧率低,现今的超声成像系统约为 30 帧/秒,这对运动器官的实时诊断存在不利的影晌;空间分辨率不够高,成像分辨率不如 X 射线;超声成像是从大量背景噪声中提取有用的信息,图像受噪声干扰严重。因此,成像质量总的来讲并不理想,有待进一步改进。

## 1.2 国内外研究进展

现代医学超声诊断仪可以说是最新医学超声基础理论研究、新型压电材料和超声传感器、计算机处理、声成像技术与信息传输技术相结合的产物。20 世纪 70 年代以 B 型超声显像技术为特征;80 年代以彩色 Doppler 血流成像技术为特征;



## 1.2.2 谐波成像(harmonic imaging, HI)

通常超声传感器中的压电振子以固有频率谐振,发射基频超声波。若产生频率为基频几倍的超声波则称为  $n$  次谐波,如图 1.2 所示。

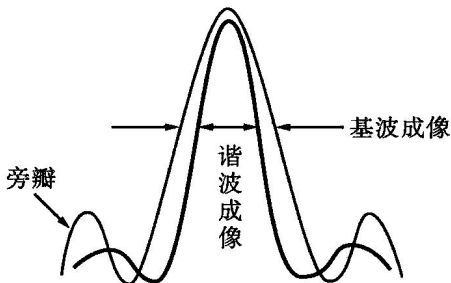


图 1.2 基频波束和谐波波束成像分辨率比较

图 1.3 所示的是超声二次谐波成像,它利用接收 2 倍于基频的超声信号来提取有用信息并结合到所显示的图像上。二次谐波信号只在特定情况下才能激发产生,并被高灵敏超声传感器接收。图 1.3 的上图为基波成像,下图为二次谐波成像,可见二次谐波成像质量明显高于基波成像。不过由于声衰减量与频率平方成比例,通常二次谐波超声信号是很弱的。目前利用的二次谐波成像技术主要有两种,即自然组织二次谐波成像和造影剂二次谐波成像。前者来自于检测组织所产生的非线性声学效应,后者则来自于造影剂微气泡突然破裂所产生的激波信号。

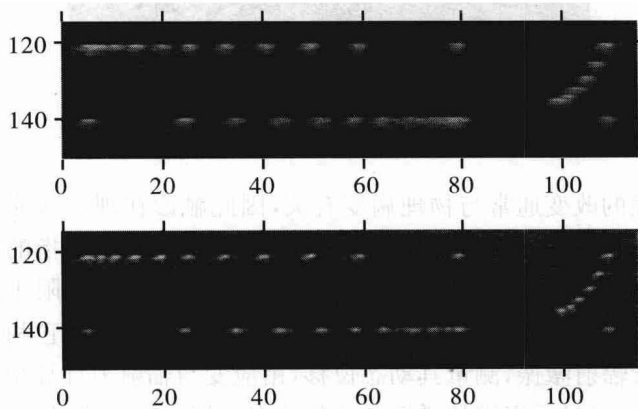


图 1.3 基波成像和二次谐波成像效果比较





肌弹性成像(myocardial elastography, cardiac elastography)、采用低频振动激励的声弹性成像(sonoelastography, sonoelasticity imaging)、基于脉冲激励和超快速超声成像系统的瞬时弹性成像或者脉冲弹性成像(transient elastography, pulsed elastography)、采用声辐射力激励的声辐射力脉冲成像(acoustic radiation force impulse imaging, ARFI imaging)、剪切波弹性成像(shear wave elasticity imaging, SWEI)等。

### 1.2.5 合成孔径成像(synthetic aperture imaging)

合成孔径聚焦(synthetic aperture focusing technique, SAFT)超声成像是20世纪70年代发展起来的一种比较有潜力的成像方法,其最初思想可以追溯到20世纪50年代发展起来的合成孔径雷达技术(SAR)。它以点源传感器在被测物体的表面上扫描,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低的工作频率和较小的传感器孔径获得较好的分辨率。SAFT技术要求采样和存储每一个孔径点的整个回波信号,即全波采样,其重建理论较复杂,无论对硬件或软件要求都比较高。其后人们又提出各种改进方案,如多阵元合成孔径聚焦(multi-element synthetic aperture focusing, M-SAF)、合成聚焦(synthetic focusing, SF)、合成发射孔径(synthetic transmit aperture, STA)、合成接收孔径(synthetic receive aperture, SRA)。

在合成孔径成像的研究方面,丹麦理工大学的J. A. Jensen领导的快速超声成像中心成果显著,主要体现在:(1)完成了实时合成孔径超声成像系统;(2)利用合成孔径血流向量成像(synthetic aperture vector flow imaging)技术,测量横向血流速度(transverse flow imaging)。

### 1.2.6 Fourier 成像系统(fourier imaging)

为了提高成像质量,探索新的成像理论和算法,Jian-yu Lu在1997年提出了一种Fourier超声成像系统。在这种方法中,首先发射脉冲平面波或Array beam到要成像的物体上,然后用参数不同的Array Beam对接收到的回波信号进行加权处理,其结果经插值后就得到图像的空间频谱,最后通过Fourier逆变换就可得到二维或三维超声图像。由于这种成像算法的核心是Fourier变换,所以系统又称为Fourier成像系统。因其仅需一次发射就可重构一帧图像,这种方法可以达到高帧率(high frame rate, HFR)的成像输出。比如在生物软组织中,声波的传播