

◇ 研究报告 ◇

结合空化微泡母小波变换的高空化噪声比超快速 主动空化成像方法*

田淑爱 丁 婷[†] 田志鑫 杨 录

(中北大学 “生物医学成像与影像大数据” 山西省重点实验室 太原 030051)

摘要: 为了提高空化图像的质量, 该文提出一种结合空化微泡母小波技术 (CBWT)、波束合成和平方差值求和减影 (SSD) 的超快速主动空化成像方法。该方法首先发射平面波并接收空化回波信号; 其次, 基于 RPNNP 模型构建空化微泡母小波, 对空化回波信号进行连续小波变换; 再次, 对获得的小波系数进行波束合成, 包括延迟叠加算法 (DAS)、最小方差算法 (MV) 和相干系数最小方差算法 (MVCF), 再结合 SSD, 得到空化图像。结果表明, 与未采用 CBWT 相比, 基于 CBWT-DAS-SSD、CBWT-MV-SSD 和 CBWT-MVCF-SSD 的空化噪声比分别提高了 16.34 dB、15.07 dB、17.71 dB。该方法可提高空化成像质量, 为空化动态实时监控提供参考。

关键词: 超快速超声空化成像; 微泡母小波技术; 波束合成算法; 数字减影

中图分类号: R445.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)06-0849-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.06.007

An ultrafast active cavitation imaging with high cavitation-to-noise ratio based on cavitation bubble wavelet transform

TIAN Shu'ai DING Ting TIAN Zhixin YANG Lu

(Shanxi Provincial Key Laboratory of "Biomedical Imaging and Imaging Big Data", North University of China,
Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the quality of cavitation image, in this paper, an ultrafast active cavitation imaging combined cavitation bubble wavelet (CBWT), beamform algorithm and sum-of-squared differences (SSD) algorithm is proposed. Firstly, plane wave pulse is transmitted and cavitation echo signal is received. Secondly, based on RPNNP model, the cavitation bubble mother wavelet is constructed and continuous wavelet transform is performed on cavitation echo signal. Thirdly, the obtained wavelet coefficients are beformed by delay-and-sum algorithm (DAS), minimum-variance algorithm (MV) and coherence coefficient minimum variance algorithm (MVCF). Furthermore, SSD algorithm is used to obtain the cavitation image. The results show that compared with cavitation images without CBWT, the cavitation-to-noise ratios of cavitation images based on CBWT-DAS-SSD, CBWT-MV-SSD and CBWT-MVCF-SSD increased by 16.34 dB, 15.07 dB and 17.71 dB, respectively. The method in this paper can improve the quality of cavitation image, and may provide reference for dynamic real-time monitoring of cavitation bubbles.

Keywords: Ultrafast active cavitation imaging; Cavitation bubble wavelet transform; Beamform algorithm; Digital subtraction

2020-06-26 收稿; 2020-09-11 定稿

*国家自然科学基金青年科学基金项目 (11604305), 山西省自然科学面上青年基金项目 (201901D211232)

作者简介: 田淑爱 (1995-), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向: 超声空化成像。

[†] 通信作者 E-mail: dting@nuc.edu.cn

0 引言

聚焦超声治疗^[1-3] (Focused ultrasound surgery, FUS) 是利用超声束良好的方向性、可穿透性和可汇聚性, 将体外超声聚焦到体内靶病变区域, 通过热效应、空化效应和机械效应等达到治疗效果。其中空化效应是肿瘤热消融、体外碎石、超声溶栓以及超声药物控制释放等超声治疗的关键机制。为了控制和利用空化效应以实现 FUS 的高效精准治疗, 必须对 FUS 过程中的声空化进行监控成像。

目前, 现有的声空化检测和成像的方法主要是光学法和声学法。光学法主要是通过高速/超高速摄影^[4-5] (High-speed photography, HSP)、声致发光^[6-7] (Sonoluminescence, SL) 以及声致化学发光^[8] (Sonochemiluminescence, SCL) 和光衰减法等。光学方法可以直观记录空化泡的行为和时空动态分布, 但对于某一断层面的空化分布无法给出具体信息, 且受限于透明介质。声学法包括主动空化成像^[9] (Active cavitation imaging, ACI) 和被动空化成像^[10] (Passive cavitation imaging, PCI)。Farny 等^[11] 和 Gyongy 等^[12] 使用线阵换能器, 线阵阵元不发射只接收的方式进行数据采集空化信号, 然后通过波束合成算法计算时间能量进行二维重建得到被动空化成像, 然而对于提供准确的空间位置信息的一级重建算法有待提升。主动空化成像包括普通 B 模式空化成像和超快速空化成像方法。由于声空化具有瞬态特性, 普通 B 模式超声成像采用逐线扫描模式, 成像速度较慢, 无法捕获空化微泡瞬态特性。Gateau 等^[13] 提出了一种超快主动空化成像 (Ultrafast active cavitation imaging, UACI) 技术, 该技术采用高帧速率的平面波发射模式, 但是基于平面波的空化成像质量较差, 需要依赖于后端波束合成算法以改进图像横向分辨率和信噪比。目前常用的后端波束合成算法包括延迟叠加 (Delay-and-sum, DAS) 算法、最小方差 (Minimum variance, MV) 算法和相干系数最小方差 (Coherence factor based minimum variance, MVCF) 算法。

空化微泡母小波 (Cavitation bubble wavelet transform, CBWT) 技术是近年来提出的一种新型平面波超快速超声空化主动成像方法, 它可在保

留平面波高帧频低能量的同时, 提高空化噪声比 (Cavitation-to-noise ratio, CNR)。Liu 等^[14] 利用 RPNNP 模型构造母小波, 并且用波束合成后的信号进行小波变换得到空化图像。Bai 等^[15] 基于特征空间的脉冲反转次谐波和超快速超声空化成像相结合, 保证了波束合成图像的质量, 提高了图像的分辨率。黄玉蓉等^[16] 在超声诊断的造影成像中利用 Doinikov 模式构建造影微泡母小波, 先进行连续小波变换, 再由小波系数代替原始回波信号, 最后对其进行后续波束合成得到造影图像。本文提出一种结合 CBWT、波束合成和平方差值求和减影 (Sum-of-squared differences, SSD) 的超快速主动空化成像方法, 以获得高质量的空化图像。首先, 采用基于平面波的超快速超声空化主动成像方法, 获取空化微泡原始回波信号; 其次, 基于 RPNNP 模型构建空化微泡母小波, 并对空化微泡原始回波信号进行连续小波变换; 再次, 对获取的小波系数进行多种波束合成算法, 并结合 SSD 减影算法, 提高空化图像质量。为验证方法有效性, 本文讨论了 CBWT、3 种波束合成算法 (DAS、MV、MVCF) 以及 SSD 数字减影算法对空化图像 CNR 值的影响, 实验结果表明 CBWT-MVCF-SSD 空化图像最优, 其 CNR 值比 DAS 空化图像高 31.73 dB。

1 实验系统

实验系统包括聚焦超声系统和 Verasonics 平面波超声采集系统两部分, 两者之间通过一个任意波形发生器进行时序控制。如图 1 所示, 聚焦超声换能器固定在透明有机玻璃水槽 (50 cm×40 cm×30 cm) 的侧壁, 水槽中充满自来水, 并保持

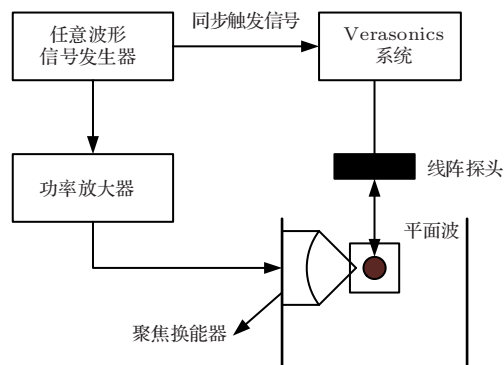


图 1 基于超快速主动空化实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultra-fast active cavitation experiment system

在室温 ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)。水槽壁和底部放置有吸声材料,用以减少聚焦超声声束的多次反射干扰。聚焦超声系统是由聚焦超声换能器和功率放大器构成。聚焦超声换能器是单阵元凹面探头,其中心频率为 1.2 MHz ,孔径 150 mm ,聚焦超声功率为 72 W 。聚焦超声作用时间是 1 ms ,作用停止后触发信号输入到 Verasonics 系统时,选择的线阵探头的中心频率为 5 MHz ,带宽为 80% ,阵元数为 128 ,采样率为 40 MHz ,发射并接收平面波信号,采集得到空化微

泡原始回波信号,该回波信号在数值仿真软件中进行处理。

2 研究方法

本文提出结合 CBWT、波束合成和 SSD 减影的超快速主动空化成像方法,如图2所示,给出了本文3部分算法:CBWT算法、波束合成算法(DAS、MV和MVCF)以及SSD数字减影。

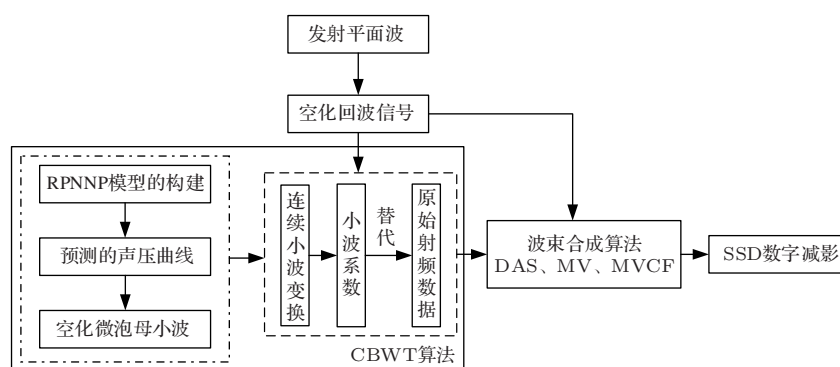


图2 CBWT结合波束合成以及SSD数字减影研究流程图

Fig. 2 CBWT combined beam synthesis and SSD digital subtraction research flowchart

2.1 基于平面波的空化微泡母小波技术

2.1.1 构建空化微泡母小波

本文所研究的空化微泡属于无包膜的自由气泡,并且假设初始微泡是静止不动,微泡振动过程中一直保持球形而没有形状改变的理想状态。RPNNP模型^[17]假设符合这一理论,其模型表达式为

$$\begin{aligned} R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \\ = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - P_V \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} \right. \\ \left. + P_V - P_A - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

利用四阶 Runge-Kutta 方法对与时间有关的半径进行数值求解,可以得到微泡振动半径随时间的变化曲线 $R(t)$ 。振动微泡辐射出的声压曲线 $P(t)$ 计算公式如下:

$$P(r, t) = \frac{\rho}{r} (R^2(t)\ddot{R}(t) + R(t)\dot{R}^2(t)), \quad (2)$$

其中, r 是驱动声压到微泡中心的距离。

在常温 20° 下,在液体水中的 RPNNP 模型中各符号的含义以及仿真需要的参数如表1所示。根

据空化泡尺寸分布^[18]相关研究,这里将初始半径设置为 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

通过对公式(1)和公式(2)求解,可预测出空化微泡回波声压曲线,如图3所示。将预测的声压曲线 $P(t)$ 进行归一化,作为空化微泡母小波。声学参数是平面波传输的声场分布参数,驱动声压是实际测量值,如图3(a)所示。

表1 RPNNP模型中符号的含义与仿真计算时使用的参数

Table 1 Meaning of symbols in RPNNP model and parameters used in simulation calculation

参数	参数名称及单位	数值
C	液体中声速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1540
ρ	液体密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1000
P_V	液体静态压/kPa	101
P_A	水蒸气的压强/kPa	2.33
σ	液体表面张力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.0727
κ	气体的多方系数	1.4
μ	液体的粘滞系数/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.001

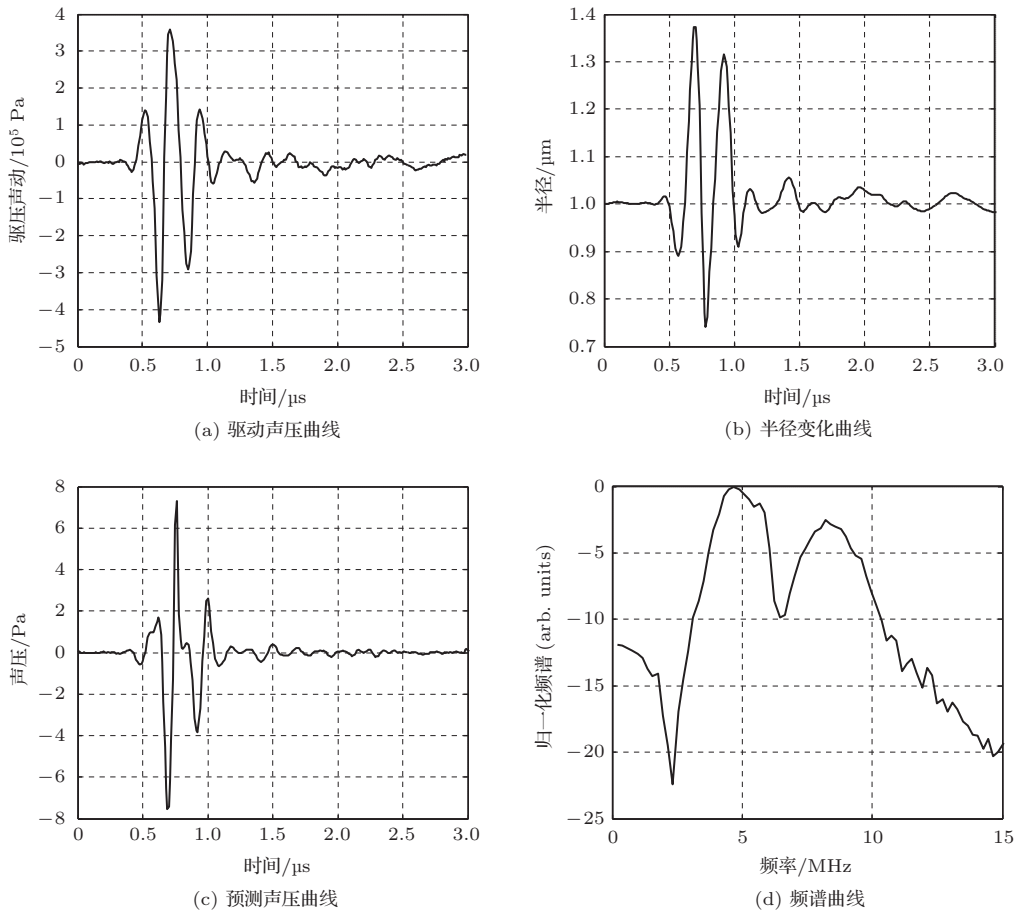


图3 空化微泡 RPNNP 模型仿真结果图

Fig. 3 Simulation results of cavitation microbubble RPNNP model

2.1.2 空化微泡母小波技术

本文采用基于平面波超快速超声空化主动成像,平面波高帧频采集到空化回波信号 $E(t)$,将空化微泡母小波 $\varphi(t)$ 作为小波基,对回波信号 $E(t)$ 进行连续小波变换。关于回波信号 $E(t)$ 的连续小波变换可以定义为

$$W_E(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (3)$$

其中, $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, “*” 表示的为 $\varphi_{a,b}$ 的复共轭, a 表示尺度因子, b 表示平移因子。

基于空化回波信号与构建的空化微泡母小波具有相关性,本文将两者进行连续小波变换,其实质是将尺度变化下的空化回波信号与空化微泡母小波信号进行卷积运算,得到一系列关于尺度的小波系数,小波系数将代替原始回波信号。本文参考 Liu 等^[14] 的相关研究,将小波尺度设置为 23。

2.2 波束合成算法

平面波发射的不聚焦性,导致空化图像质量降低,为了提高 CBWT 后的图像质量,需要后端进行波束合成。本文采用 DAS、MV 和 MVCF 三种波束合成算法,DAS 算法是通过对不同信道接收的回波信号进行特定的延迟再叠加求和,得到目标点的聚焦信号;MV 算法是在回波信号没有失真的情况下,在特定方向上输出能量最低,得到最优的加权值。

MVCF^[19] 波束合成是在最小方差的基础上加入相干系数,进一步提高了图像质量。选取目标点并根据目标点位置计算波束合成的有效阵元数大小,记为 M 。根据目标点位置对 M 个阵元通道信号计算延时,得到延时后的信号,记为 $\mathbf{X}(t)$:

$$\mathbf{X}(t) = [x_0(t) x_1(t) \cdots x_{M-1}(t)]^T. \quad (4)$$

把阵元数为 M 的阵列分为长度为 L 的子阵,子阵的总数为 $M - L + 1$,计算 $\mathbf{X}(t)$ 空间平均相关

矩阵 $\mathbf{R}(t)$:

$$\mathbf{R}(t) = \frac{1}{M-L+1} \sum_{l=1}^{M-L+1} \mathbf{X}^l(t) \mathbf{X}^{l(t)\text{H}}. \quad (5)$$

用 $\mathbf{R}(t) + \gamma \mathbf{I}$ 来代替 $\mathbf{R}(t)$, 实现对角线加载, 其中 $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\gamma = \Delta \cdot \text{trace}\{\mathbf{R}(t)\}$, $\text{trace}\{\mathbf{R}(t)\}$ 为相关矩阵的迹, Δ 为算法加入的空间噪声与信号功率比。取 $\mathbf{a}$ 为单位向量, 并用式 (4) 的 $\mathbf{R}(t)$ 计算最优加权系数 $\mathbf{w}(t)$:

$$\mathbf{w}(t) = \frac{\mathbf{R}(t)^{-1} \mathbf{a}}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}(t)^{-1} \mathbf{a}}. \quad (6)$$

计算 $\mathbf{X}(t)$ 的相干系数 (Coherence factor, CF), CF 定义为相干方向的能量与阵元信号总能量的比值:

$$\text{CF}(t) = \frac{\left| \sum_{m=1}^M X(m, t) \right|^2}{M \sum_{m=1}^M |X(m, t)|^2}. \quad (7)$$

该目标点的最优输出 $\hat{y}(t)$:

$$\hat{y}(t) = \frac{\text{CF}(t)}{M-L+1} \sum_{l=1}^{M-L+1} \mathbf{w}^H(t) \mathbf{X}^l(t). \quad (8)$$

2.3 SSD 数字减影算法

数字减影是一种基于 B 超视频数据的处理方法, 通过减影法可以消除两幅图像之间的差异, 从而消除了背景噪声带来的高回声影响。本文采用平方差求和数字减影算法, 即 SSD 数字减影算法, 计算公式如下:

$$\text{DI}(z, x) = \sum_{j=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \sum_{i=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} [I_n(z+i, x+j) - I_b(z+i, x+j)]^2, \quad (9)$$

其中, $I_n(z, x)$ 、 $I_b(z, x)$ 分别表示聚焦照射不同时间的 B 超图像, z 为深度, x 为扫描方向, n 为计算的窗宽。

3 结果与讨论

图 4 是尺度为 23 时 CBWT 前后 3 种波束合成算法空化图像对比结果。图 4(a) 是空化原始数据直接成像效果图。图 4(c)、图 4(e) 和图 4(g) 是 CBWT 前, 3 种不同的波束合成算法对图像的质量的影响, DAS 和 MV 波束合成算法周围噪声影响较大; MV 算法提高了空间分辨率, 但是没有提高对比度; MVCF 算法是在 MV 算法基础上加入了相关系

数, 图像空间分辨率和对比度均有所提高, 空化图像质量最佳。图 4(d)、图 4(f) 和图 4(h) 是 CBWT 后, CBWT 技术结合 3 种波束合成算法后的空化图像。将图 4(d)、图 4(f) 和图 4(h) 与图 4(c)、图 4(e)、图 4(g) 进行比较, 图像的噪声有所减少, 空化图像质量有所提高, 说明 CBWT 对周围组织和噪声有抑制作用。CBWT 是应用小波变换的解相关算法, 将预测的回波信号与空化信号进行小波变换构建空化微泡母小波, 得到的小波系数与原始的回波信号具有很高的相似性。波束合成算法效果中, 在 CBWT 前后, MVCF 算法最佳, 整体最佳效果为 CBWT-MVCF。

空化噪声比 (CNR) 是评价空化图像质量的重要指标, 其表达式为

$$\text{CNR} = 10 \lg(I_{\text{cavitation}}/I_{\text{noise}}), \quad (10)$$

其中, $I_{\text{cavitation}}$ 指的是 ROIs 区域空化的平均强度, ROIs 区域选择为空化微泡区域; I_{noise} 指的是同等面积大小下周围噪声的平均强度。

表 2 是 CBWT 前后空化图像 CNR 值的对比。通过表中的数据发现, 使用 CBWT 后, 进行波束合成对于图像 CNR 有一定提升。DAS 算法的 CNR 值提高了 0.27 dB, MV 算法的 CNR 值提高了 0.36 dB, MVCF 算法的 CNR 值提高了 1.17 dB。CBWT 中构造母小波与空化微泡信号的相关性较高, CBWT 技术抑制了周围噪声和组织信号。通过研究分析, 在 CBWT 后, CBWT-MVCF 效果最佳, 空化图像质量较好。

表 2 CBWT 前后空化图像的 CNR 值

Table 2 The CNRs of cavitation images before and after CWBT

算法	CNR/dB	算法	CNR/dB
DAS	7.52	CBWT-DAS	7.79
MV	6.48	CBWT-MV	6.84
MVCF	21.54	CBWT-MVCF	22.70

图 5 是 CBWT 对于 3 种波束合成算法结合 SSD 减影图像的对比, 图 5(a)、图 5(c) 和图 5(e) 是 CBWT 前波束合成进行了 SSD 数字减影, 图 5(b)、图 5(d) 和图 5(f) 是 CBWT 后波束合成进行 SSD 数字减影。SSD 减影算法很大程度上抑制了周围组织和噪声, 图像分辨率得到提高, 进一步提高了空化图像的质量。

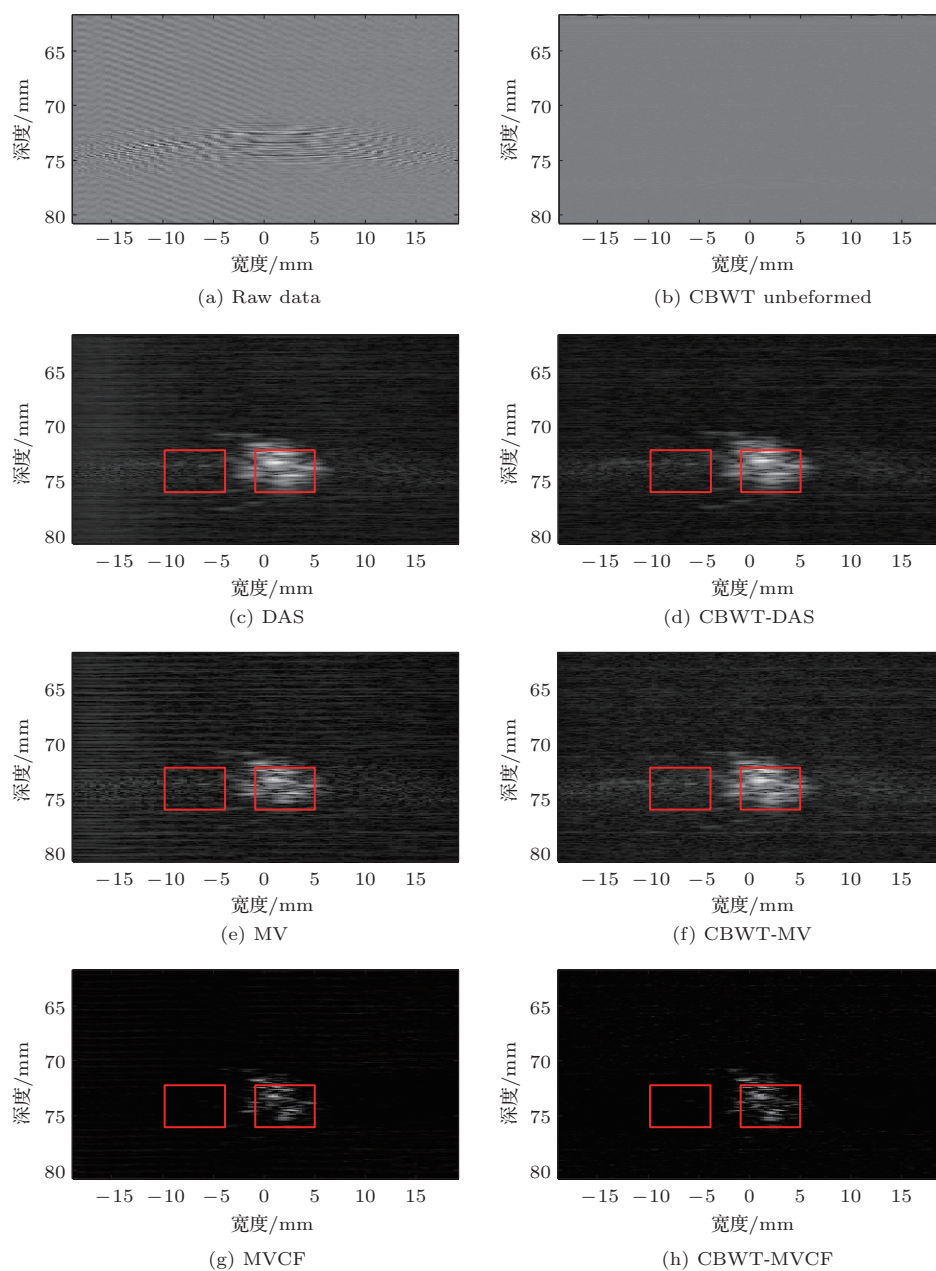


图4 CBWT前后不同波束合成算法空化图像对比

Fig. 4 Comparison of cavitation images with different beam synthesis algorithms before and after CBWT

将SSD数字减影后的图像与DAS、MV、MVCF空化图像进行对比, SSD数字减影算法在消除了背景噪声后的图像明显优于只单独进行波束合成算法时的空化图像。CBWT结合波束合成算法与数字减影算法处理后的空化图像, 去除背景噪声的干扰, 空化图像的质量同样优于只进行波束合成算法的空化图像。但与波束合成后进行数字减影的图像效果差异较小, 所以本文图像质量评价指标参考表3中CNR值。CNR值显示CBWT-MVCF-SSD效果最佳。

表3是结合CBWT和SSD前后空化图像的CNR值。通过与表2进行比较, DAS-SSD、MV-SSD以及MVCF-SSD三种算法, CNR值分别提高了15.99 dB、13.51 dB、10.19 dB; CBWT-DAS-SSD、CBWT-MV-SSD、CBWT-MVCF-SSD三种算法, CNR值分别提高了16.34 dB、15.07 dB、17.71 dB。从数据可以看出, 通过SSD减影算法, 提高了空化噪声比, 可以验证SSD算法是有效的。CBWT-MVCF-SSD的CNR值最高, 比DAS空化图像高31.73 dB, 三者相结合的效果最佳。

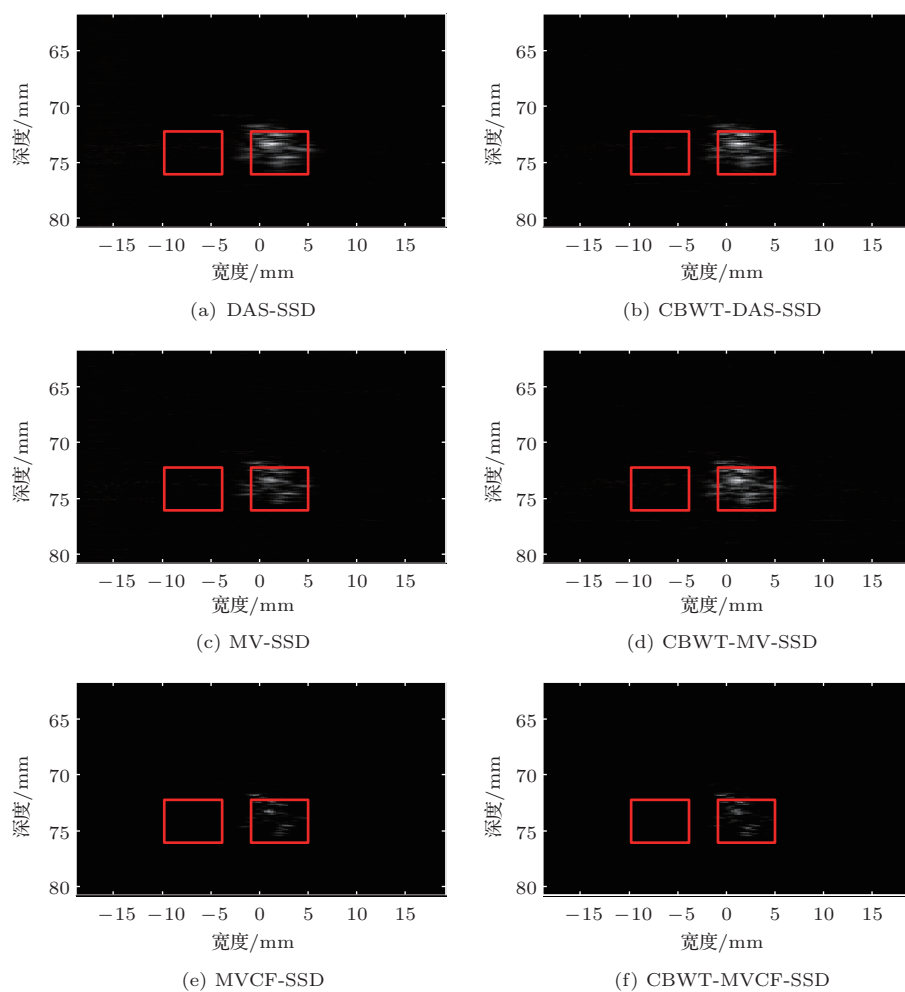


图5 CBWT 对于不同波束合成算法结合 SSD 减影图像的影响

Fig. 5 The effect of CBWT on different beam synthesis algorithms combined with SSD subtraction images

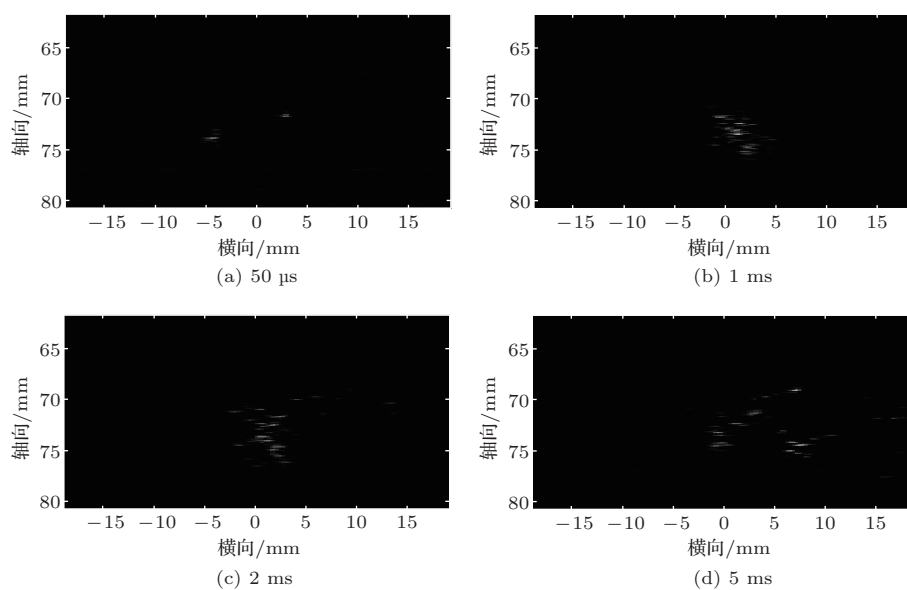


图6 CBWT-MVCF-SSD 最佳效果不同聚焦时刻下空化泡群分布序列图

Fig. 6 CBWT-MVCF-SSD distribution sequence diagram of cavitation bubble group at different focusing moments for best results

表3 结合CBWT和SSD前后空化图像的CNR值

Table 3 The CNRs of cavitation images before and after CBWT and SSD

算法	CNR/dB	算法	CNR/dB
DAS-SSD	23.51	CBWT-DAS-SSD	23.86
MV-SSD	19.99	CBWT-MV-SSD	21.55
MVCF-SSD	31.73	CBWT-MVCF-SSD	39.25

图6是基于CBWT-MVCF-SSD的空化动态监控序列图,分别是聚焦超声作用50 μ s、1 ms、2 ms、5 ms时的空化图像,图中高亮区域为泡群,显示了不同聚焦超声作用时刻空化分布情况,从而达到对空化活动的动态监控。

4 结论

本文提出一种结合CBWT、波束合成和SSD数字减影的超快速主动空化成像方法,主要讨论了CBWT、3种波束合成算法(DAS、MV、MVCF)以及SSD数字减影算法对空化图像CNR值的影响,实验结果表明,CBWT结合波束合成算法可提高空化图像的质量和CNR值,且CBWT-MVCF的效果最佳。进一步结合SSD数字减影,CBWT-MVCF-SSD空化图像最优,其CNR值可比DAS空化图像高31.73 dB,可实现对空化活动的动态监控。

参 考 文 献

- [1] Szabo T L. Diagnostic ultrasound imaging: inside out[M]. New York: Academic Press, 2004.
- [2] Elias W J, Kassell N F. Focused ultrasound surgery[J]. Neurosurgical Focus, 2012, 32(1): Introduction.
- [3] 冯若. 高强度聚焦超声(HIFU)无创外科——21世纪治疗肿瘤的新技术[J]. 应用声学, 2001, 20(2): 38–42.
Feng Ruo. High intensity focused ultrasound (HIFU) non-invasive surgery—A new technology for the treatment of tumors in the 21st century[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(2): 38–42.
- [4] Swart B, Zhao Y, Khakua M, et al. In situ characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography[J]. Chemical Engineering Science, 2020, 225: 115836.
- [5] 孙雪, 张宇宁. 基于高速摄影技术的自由液面附近空化现象研究[C]. 2019年全国工业流体力学会议摘要集, 2019.
- [6] Gao Y, Du X. Stability mechanisms of gas bubbles subject to ultrasonic field during the rectified diffusion in liquids[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(New Series), 2019, 26(1): 68–76.
- [7] 赵瑾瑜, 陶超, 张淑仪, 等. 激光协同聚焦超声辐照生物样品增强热效应的实验和理论研究[J]. 声学学报, 2018, 43(4):

665–672.

- Zhao Jinyu, Tao Chao, Zhang Shuyi, et al. Experimental and theoretical studies on the thermal effect enhancement of biological samples irradiated by laser co-focused ultrasound[J]. Acta Acustica, 2018, 43(4): 665–672.
- [8] Yin H, Qiao Y, Cao H, et al. Cavitation mapping by sonochemiluminescence with less bubble displacement induced by acoustic radiation force in a 1.2 MHz HIFU[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(2): 559–565.
- [9] 马学进, 高琨, 王娜, 等. 高空化组织比的宽带次谐波主动空化成像方法[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(6): 938–944, 956.
- Ma Xuejin, Gao Kun, Wang Na, et al. Broadband subharmonic active cavitation imaging method with high cavitation tissue ratio[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2019, 36(6): 938–944, 956.
- [10] 许欢. 基于信号处理的声空化监控及组织异常信号检测[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [11] Farny H C, Holt G R, Ronald A R. Temporal and spatial detection of HIFU-Induced inertial and hot-vapor cavitation with a diagnostic ultrasound system[J]. Ultrasound in Medicine and Biology, 2009, 35(4): 603–615.
- [12] Gyngy M, Coussios C C. Passive spatial mapping of inertial cavitation during HIFU exposure[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2010, 57(1): 48–56.
- [13] Gateau J, Aubry J F, Pernot M, et al. Combined passive detection and ultrafast active imaging of cavitation events induced by short pulses of high-intensity ultrasound[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(3): 517–532.
- [14] Liu R, Hu H, Xu S, et al. Ultrafast active cavitation imaging with enhanced cavitation to tissue ratio based on wavelet transform and pulse inversion[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(6): 3099–3106.
- [15] Bai C, Xu S, Duan J, et al. Pulse-inversion subharmonic ultrafast active cavitation imaging in tissue using fast eigenspace-based adaptive beamforming and cavitation deconvolution[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2017, 64(8): 1175–1193.
- [16] 黄玉蓉, 余锦华, 汪源源, 等. 基于微泡母小波变换的超声造影成像方法[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(1): 37–42.
Huang Yurong, Yu Jinhua, Wang Yuanyuan, et al. Ultrasound contrast imaging method based on microbubble mother wavelet transform[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2018, 31(1): 37–42.
- [17] Plesst M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 277–282.
- [18] 徐珊珊. 空化微泡尺寸分布与包膜微泡时空控制释放[D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [19] 丁婷, 胡虹, 杨录, 等. 融合最小方差自适应和相干系数波束合成的超快速主动空化成像方法[J]. 测试科学与仪器, 2017, 8(1): 68–77.
- Ding Ting, Hu Hong, Yang Lu, et al. Minimum variance adaptive beamforming combined with coherence factor weighting applied to ultrafast active cavitation imaging[J]. Test Science and Instruments, 2017, 8(1): 68–77.