

基于编码发射与自适应波束形成的超声成像

郑驰超 彭虎

(中国科学技术大学电子科学与技术系 合肥 230027)

摘要: 与传统的延时叠加(DAS)波束形成的成像方法相比, Capon 算法可以有效地提高医学超声成像的横向分辨率, 但不能提高成像的对比度。该文提出一种新的成像方法 Chirp_Capon 算法, 即将超声编码发射技术与 Capon 算法相结合, 利用编码信号优异的相关特性来弥补 Capon 算法在对比度上的不足, 从而得到了较好的成像结果。仿真结果表明相对于 Capon 算法, 该算法不仅具有较高横向分辨率, 而且可以有效提高图像的对比度和信噪比。

关键词: 超声成像; Chirp_Capon 算法; 延时叠加(DAS); 对比度; 横向分辨率

中图分类号: TN911.7; R445.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0959-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00425

Ultrasound Imaging Based on Coded Exciting Technology and Adaptive Beamforming

Zheng Chi-chao Peng Hu

(Department of Electronic and science Technology University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Compared with traditional imaging algorithm based on Delay and Sum (DAS), Capon algorithm can increase horizontal resolution of medical ultrasound image, but the contrast is not improved. A new algorithm named Chirp_Caopn is proposed in this paper, which combines ultrasound coded exciting technology with Capon algorithm, so the excellent relation of coded signal can remedy the common contrast of Capon algorithm. The simulated result shows that compared with Capon algorithm, the new algorithm not only improves the horizontal resolution, but also can give a high contrast image with less noise.

Key words: Ultrasonic imaging; Chirp_Capon algorithm; Delay And Sum(DAS); Contrast; Horizontal resolution

1 引言

在医学超声成像中, 波束形成一直采用传统的延时叠加法(Delay And Sum, DAS), 即对不同通道接收到的数据, 施以不同的延时, 再将其相加, 得到期望聚焦点的幅值。聚焦时, 为了减小旁瓣信号对成像对比度的影响, 人们通常采用幅度变迹技术, 对不同阵元施加不同的加权值(通常为hanning或blackman函数)。DAS虽然计算简单, 容易实现, 但其空间分辨率较低, 成像对比度较差^[1]。

Capon算法是将自适应波束形成方法用于超声成像。其主要是使噪声以及来自非信源方向上的任何干扰所贡献的功率为最小, 同时保持信源方向上的信号功率不变。由于该方法能有效地提高成像的分辨率, 使其成为超声成像的主要的研究方向之一。文献[2]研究了用于高帧率超声成像的自适应波束形成算法。文献[3]主要研究Capon算法中的不同空间平滑维数对超声成像分辨率的影响。文献[4]将

Capon算法用于超声聚焦成像。该算法虽然能有效地提高成像空间分辨率, 然而成像的对比度却没有改善。

超声编码发射技术是一种有效地提高成像对比度的成像方法。传统的超声成像所使用的超声发射信号都是峰值电压较高的脉冲波信号。超声编码发射技术是指发射具备优异的自相关性能的特殊信号比如线性调频信号等。然后在接收端采用匹配滤波得到瞬时功率较高的脉冲波, 该技术可以有效地提高成像的对比度。

本文将超声编码发射技术与Capon算法结合用于超声成像, 仿真结果表明该方法不仅可以提高图像的对比度并且进一步提高了空间分辨率。

2 成像原理及算法

在现有的超声成像方法中, 超声编码发射技术可以有效地降低旁瓣, 提高对比度, 但是不能提高超声成像的分辨率。Capon算法可以改善分辨率, 却不能提高对比度。本文提出的chirp_capon算法对成像对比度和分辨率均有改善。

2.1 超声成像的数学模型^[5]

假设, 有 M 个阵元的传感器阵列, 对空间中某

2009-03-30 收到, 2009-10-16 改回

国家自然科学基金(60871087)和2008年中国科学技术大学研究生创新基金资助课题

通信作者: 彭虎 hpeng@ustc.edu.cn

期望点的反射信号进行接收, 接收到的信号数学表达式为

$$Y_{SF}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_{m,n} x_{m,n}(t - \tau_{m,n}) \quad (1)$$

其中 $x_{m,n}$ 表示第 n 个阵元发射, 第 m 个阵元接收到信号; $\tau_{m,n}$ 是相对应的延时; $w_{m,n}$ 表示对应阵元的加权。

针对空间中某点 k , 对 $x_{m,n}$ 施加相应的延时后, 可用矩阵表达为

$$\mathbf{Y}(k) = \sum \mathbf{W}^T(k) \mathbf{X}(k) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{X}(k)$ 可表示为

$$\mathbf{X}(k) = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N] = \begin{pmatrix} x_{1,1}(k) & \cdots & x_{1,N}(k) \\ x_{2,1}(k) & \cdots & x_{2,N}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1}(k) & \cdots & x_{N,N}(k) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}(k) = \sum [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_N] \cdot \begin{pmatrix} x_{1,1}(k) & \cdots & x_{1,N}(k) \\ x_{2,1}(k) & \cdots & x_{2,N}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1}(k) & \cdots & x_{N,N}(k) \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N]$ 为加权值, 传统波束形成算法中, 如式(4), 采用幅度变迹, 即将权值 \mathbf{W} 设为固定值, 如Hanning窗, Blackman窗等。当加权值为一组值为1的向量时, 即为传统的延时叠加算法。

2.2 线性调频信号

在现有的超声成像方法中, 超声编码发射技术可以有效地降低旁瓣, 提高对比度, 但是不能提高超声成像的分辨率。在超声编码发射技术中, 线性调频信号(Chirp信号)是使用最广泛的编码信号, 他是一种脉冲压缩信号, 常用于雷达系统。其表达式为^[6]

$$e(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0 t + \frac{B}{2T} t^2\right)\right\}, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5)$$

式中 T 为信号持续时间, f_0 信号中心频率, B 为信号带宽。

脉冲压缩就是系统发射时域宽度较宽而峰值功率低的信号, 在收端用匹配滤波器进行压缩处理以获得高峰值的窄脉冲, 从而提高系统的探测性能。

$$e_{\text{new}}(t) = e_t(t) * e_r(t) \quad (6)$$

其中 $e_t(t)$ 代表原始信号, $e_r(t)$ 代表接收信号, “*” 为卷积。

当线性调频信号通过匹配滤波器处理后, 得到相应的窄脉冲。输入和输出信号的脉冲宽度之比称为脉冲压缩比, 可以证明线性调频信号的脉冲压缩比为

$$CR = T \times B \quad (7)$$

2.3 Capon算法

Capon算法是目前用于提高超声成像的分辨率的一种有效的方法, 但是其没有改变成像的对比度, 标准Capon算法(standard Capon beamformer)的核心就是寻找最佳的加权矢量 \mathbf{W} , $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_N)$, 在保持用户期望方向 θ 的增益不变的条件下, 使阵列的输出能量最小化, 达到压制噪声和干扰的目的^[7]。其数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W} \\ \text{s.t. } \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 \mathbf{R}_{xx} 表示 $x(t)$ 的自协方差矩阵, $\mathbf{a}(\theta)$ 表示指向期望方向 θ 的方向向量, 对于窄带信号而言, $\mathbf{a}(\theta)$ 是一组与信号频率和延时有关的复数。利用拉格朗日乘法, 可以解出约束条件下求极值的问题, 解得最佳加权向量为

$$\widehat{\mathbf{W}} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}(\theta)^T \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \quad (9)$$

对于超声成像的宽带信号而言, $\mathbf{a}(\theta)$ 不能再简单表示为一组复数。比较简单的解决方法是, 利用延时叠加法中的延时处理, 这样方向向量就可以表示为 $\mathbf{a} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。

2.4 Chirp_Capon算法

Capon算法虽然可以提高超声成像的分辨率, 但是没有改善成像的对比度。因此本文将其与编码发射技术结合起来, 以得到分辨率和对比度均较好的成像结果。

本文首先对超声传感器施加如式(5)所示的线性调频信号, 要求线性调频信号与超声传感器的频响特性一致。

然后对每个阵元接收到的信号 $x_i(t)$ 经过匹配滤波处理后得到脉冲压缩后的新的接收信号 $y_i(t)$, 由式(6)可得

$$y_i(t) = x_i(t) * x_s(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

其中 $x_s(t)$ 是发射信号, N 是阵元数, $y_i(t)$ 是处理后的接收信号。*代表卷积。

再对得到的信号 $y_i(t)$ 用Capon算法计算出成像区域内每个成像点的权值, 跟据式(8)和式(9)可以得到权值 $w_{m,n}$, 然后进行自适应波束形成得到图像, 如下式:

$$Y_{SF}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} w_{m,n} y_{m,n}(t - \tau_{m,n}) \quad (11)$$

3 仿真结果

本文仿真结果是基于丹麦理工大学快速超声成

像(FUI)实验室提供的FieldII仿真平台来实现的。FieldII是基于线性系统空间响应原理,把传感器表面分为若干小块,将所有小块产生的空间响应叠加在一起,其和实际的成像结果非常接近^[8]。首先用FieldII的生成仿真数据集。具体仿真参数为传感器设置为64阵元的线性阵列,中心频率为3 MHz,采样频率为50 MHz,声速为1540 m/s,阵元间距为半个波长,阵列长度为30.6 mm,目标散射点共11个,分布在深度为30~70 mm,宽度为20 mm的区域内。对仿真产生的接收信号数据,加入了一定强度的高斯噪声。然后对同一个接收数据分别采用Pulse_DAS, Pulse_Capon, Chirp_DAS, Chirp_Capon等4种不同的算法进行成像,成像的动态范围设为60 dB。

表1 成像结果对比

算法	对比度	分辨率
Pulse_DAS	低	低
Pulse_Capon	低	高
Chirp_DAS	高	低
Chirp_Capon	高	高

图1为4种不同算法的成像结果,其清楚地表明Chirp_Capon算法得到的结果其对比度优于传统的Pulse_Capon算法,其分辨率高于DAS。Chirp_DAS算法虽然具有较好的对比度,但是分辨率较差。传统的Pulse_DAS对比度和分辨率均为最差。

图2是4种算法的纵向投影图,其清楚表明Chirp_Capon相对于Pulse_Capon算法,虽然纵向

分辨率并无明显提高,但其对比度提高了近10 dB。相应的Chirp_DAS算法相对于Pulse_DAS,其对比度同样提高了10 dB左右。由图2可知,4种算法在纵向分辨率上没有明显的差异。其纵向宽度在-30 dB处大约为0.8 mm。

图3是不同深度的散射点横向投影图。由图可知相对于其他算法,Chirp_Capon算法在30 cm和70 cm处的散射点成像结果最窄,其横向分辨率也最好,优于传统的Pulse_Capon算法。传统的Pulse_DAS和Chirp_DAS算法对不同深度的单个散射点成像结果横向宽度较宽,其横向分辨率也较差。也可以看出深度越深,分辨率越差,对比度也相应的下降。具体数据见表2,表2给出30 cm和70 cm处的单个散射点的在-30 dB处的横向宽度,可以明确表明不同算法的成像分辨率。其中Chirp_Capon算法成像结果最好,在30 cm处其散射点的横向宽度仅为0.8 mm,1.6倍的波长。同时由图3和图2可以看出Chirp_Capon算法其旁瓣也是最低,比传统的Pulse_Capon和Pulse_DAS方法降低了大约10 dB,比Chirp_DAS降低了3-5 dB。

4 总结

本文将超声编码发射技术与Capon算法相结合提出了Chirp_Capon算法,该算法的实质是利用编码信号优异的相关特性来弥补Capon算法在对比度上的不足。通过仿真证明,该算法与DAS算法相比,其成像结果的对比度和横向分辨率均有较大的提高,而与传统的Pulse_Capon算法相比,对比度得到明显的改善,分辨率也有相应的改善。该方法并不能有效地提高纵向分辨率。

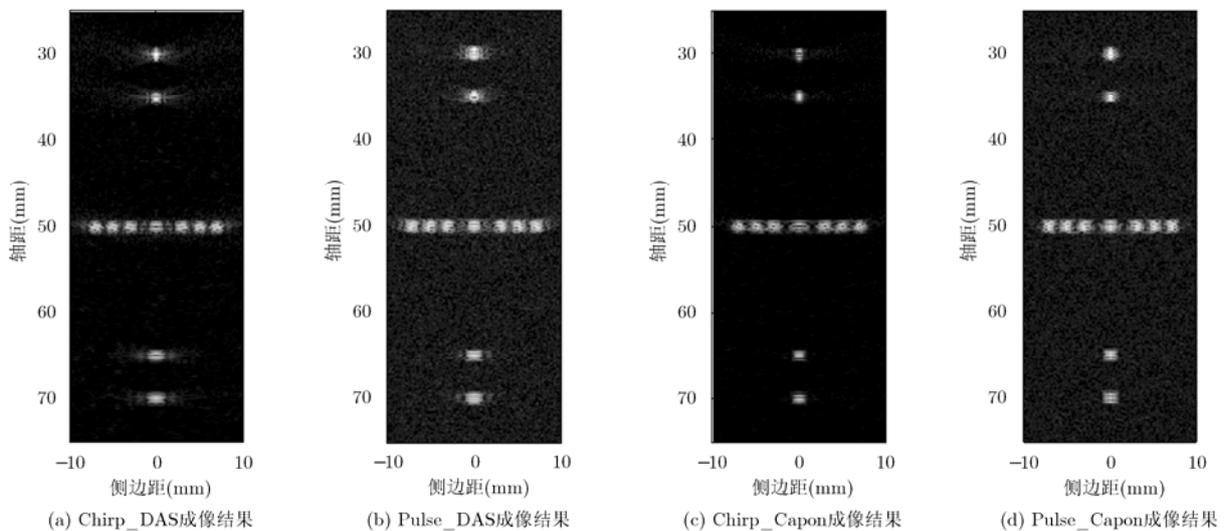


图1 成像结果

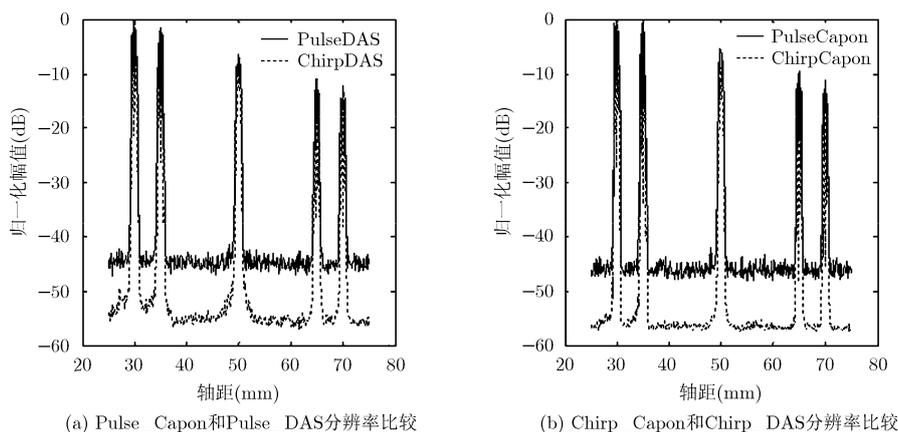


图2 4种算法的成像结果的纵向分辨率

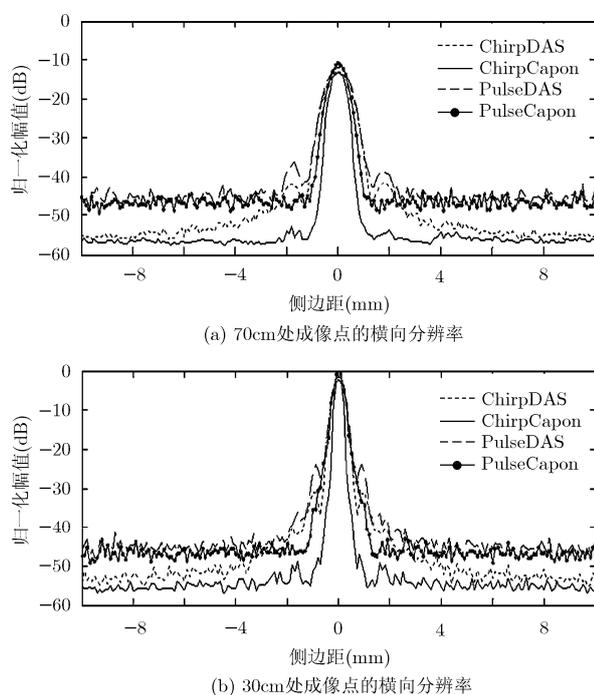


图3 不同深度的散射点的横向分辨率对比

表2 -30dB时不同深度散射点横向宽度

算法	30 cm散射点		70 cm散射点	
	mm	λ	mm	λ
Pulse_DAS	2.2 mm	4.3 λ	1.8 mm	3.5 λ
Pulse_Capon	1.2 mm	2.3 λ	1.4 mm	2.7 λ
Chirp_DAS	1.2 mm	2.3 λ	1.8 mm	3.5 λ
Chirp_Capon	0.8 mm	1.6 λ	1.1 mm	2.1 λ

注: $\lambda = c/f_0$ 为发射超声信号的波长。

参考文献

- [1] Guenther D A and Walker W F. Optimal contrast resolution beamforming[C]. IEEE Ultrasonics Symposium. New York. USA, Oct., 2007: 37-41.
- [2] Holfort I K, Gran F, and Jensen A. Minimum variance beamforming for high frame-rate ultrasound imaging[C]. IEEE Ultrasonics Symposium. New York. USA, Oct., 2007: 1541-1544.
- [3] Vignon F and 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.
- [4] Synnevag J F, Austeng A, and Holm S. Adaptive beamforming applied to medical ultrasound imaging[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(8): 1606-1613.
- [5] 杜春宁. 超声成像数字波束形成算法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学技术大学, 2007.
- [6] 韩雪梅, 彭虎, 杜宏伟等. 基于线性调频信号的高帧率超声成像系统[J]. *中国生物医学工程学报*, 2005, 24(6): 700-704.
- [7] 杜春宁, 彭虎. 一种改进的Capon波束形成算法在超声成像中的研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2007, 26(5): 690-694.
- [8] Jensen J A. Field: A program for simulating ultrasound systems [J]. *Med Biol Engineering and Computing*, 1996, 34(S1): 351-353.

郑驰超: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为医学超声成像及超声信号测量。

彭虎: 男, 1962年生, 副教授, 从事生物信号处理、超声医学成像、生物建模、微机接口与应用方面的研究。