

超声相控阵扇扫诊断仪中提高帧频的新方法

黄宇星 张春晓 程敬之

(西安交通大学生物医学仪器及工程研究室 西安·710049)

文章通过仔细分析相控延时及超声波束的空间特征,导出了相邻波束指向与延时之间的相互关系;找出了其中的规律性及可用特征。提出一种提高帧频的新方法:多波束同时合成法,从而能有效地改善彩色超声成像质量。

A new method for increasing frame frequency in ultrasonic phased-array sector scanner

HUANG Yuxing ZHANG Chunxiao CHENG Jingzhi

(Institute of Biomedical Instrument and Engineering Xian Jiaotong University 710049)

Analysing phased delay and the space features of ultrasonic beams the interrelation between the direction of the neighbouring beam and delay is developed and the useful features are found out. A new method of increasing frame frequency—simultaneous multi-beamforming is put forward to improve the qualities of the color ultrasonic imaging system.

1. 引言

在超声成像系统中,帧频等于完成一幅图像所需时间的倒数,记为 Fve 。设一幅超声图像由 N 条扫描线组成,每条扫描线能探测的最大深度为 D ,则有如下关系:

$$2Fve \cdot N \cdot D / c = 1 \quad (1)$$

式中, c 为组织中声速。由方程(1)可见,超声成像系统中,帧频、扫描线数、探测深度三者的乘积为常数,互相关联,要提高一个,必须牺牲其它两个或其中一个。

在相控阵应用于心脏超声诊断中,超声波诊断装置一般必须在1秒钟内提供25~30

幅图像,即帧频必须在25Hz以上。因为心脏每分钟要跳动50~150次,如果帧频太低,图像质量将大受影响。一般相控阵成像系统的一幅图像由128条线组成,最大探测深度为21~24cm左右,以组织中的平均声速1540m/s代入方程(1)可得帧频大约在25Hz左右。因此,在黑白超声成像中是满足帧频要求的。在彩色超声多普勒成像中,在每一个扫描声束方向上需反复发射和接收多次超声波,才能提取出彩色多普勒血流分量。朝同一方向发射超声波的次数越多,获得的血流运动信息越准确。一般应用中,朝同一方向发射8

收稿日期:94-1-12;修回日期:94-4-15

~12次超声波束算出血流运动信息。按上面所述,彩色多普勒血流成像与黑白超声成像相比需要多花费8~12倍的时间。换句话说,即使黑白成像达到每秒30帧,以同样的速度用于彩色多普勒血流成像,却达不到每秒4帧。如此低的成像帧频是无法观察心脏这样快速运动的器官。因此,提高彩色成像的帧频一直是一个重要课题。

目前提高帧频的方法一般从以下几个方面入手:①缩短诊断距离;②缩小扫描角度;③减少扫描过程中的无功时间;④提高彩色运算装置的性能,以尽可能少的次数来获得高的计算精度。在实际应用的超声成像设备中,一般以小的彩色角度配以大的黑白角度来解决帧频过低问题;在研究领域主要在提高彩色运算装置的性能上想办法,但还未取得满意的结果。根据这个情况,作者在分析研究的基础上提出一种新的提高帧频的方法。

2.提高帧频的新方法

在通常的相控阵超声成像设备中,当对某个方向进行扫描时,相控电路对这个方向相控发、收各一次;由于此类设备中均采用脉冲超声,发射声束只能作到一点聚焦,而一点聚焦的缺点是,焦点处的波束很窄质量很好,而焦点外波束明显变宽质量显著下降。因此,相控阵超声成像设备发射声束一般采用弱聚焦均匀宽波束发射,采用实时动态聚焦以获得窄波束接收,这样就可以获得良好的成像质量。表1列出了不同扫描深度下弱聚焦声束的-3dB宽度。

从表1中我们可以看到,对于常用的等角增量(0.71°)扫描,某一方向的弱聚焦声束不仅包含本方向的聚焦声束,而且包含左、右相邻方向的聚焦声束。由此,我们得到这样一个结论:对某一方向采用弱聚焦发射,可以对这个方向本身及左右相邻方向同时进

表 1

扫描深度 (cm)	20	18	16	14
-3dB宽度	0.89°	1.02°	1.45°	2.18°
扫描深度 (cm)	12	10	8	6
-3dB宽度	3.20°	4.02°	5.38°	5.71°

行接收。这就是我们新方法的基础,它被命名为多波束同时合成法。图1为多波束同时合成法的基本原理框图。

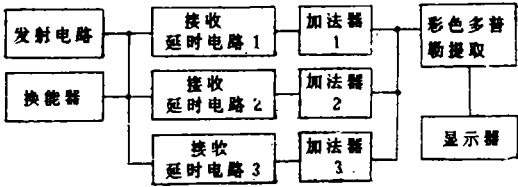


图1 多波束同时合成法基本原理框图

从图1可以看出,为了完成多波束同时合成,需要多个相控接收电路。而在相控阵超声成像设备中,相控接收电路是最重要的电路组成部分,其体积与成本均是可观的,技术难度相当高。如果在一台相控阵超声成像设备中装备几套相控接收电路是不切实际的,也是不可行的,因此需要找出一种合理的方法来完成多波束同时合成。

2.1 多波束同时合成法的可行性方法研究

在相控接收电路中,相控的实现是靠延时完成的,因此我们从分析相控延时入手寻找切实可行的实现方法。根据相控原理,当线列阵对某一方向 θ 进行扫描时,相邻两晶片之间的延时为: $\tau = d \cdot \sin\theta / c$, d 为晶片间隔。假设最大扫描角度为 $\theta_{m,x}$,在 $\theta^\circ \sim \theta_{m,x}$ 之间共有 N 条扫描线,采用等 $\Delta\theta$ 间隔扫描, $\Delta\theta = \theta_{m,x} / N$,探头共有 M 个阵元。则对某一扫描角度: $\theta_n = \Delta\theta \cdot n = n \cdot \theta_{m,x} / N$ (2) 探头阵元 m 的延时量为:

$$\tau_{n,m} = \frac{(m-1)d}{c} \sin \frac{n \cdot \theta_{m,x}}{N} \quad (3)$$

$\tau_{n,m}$ 表示在第 n 条扫描线,阵元 m 所需的延时。
当 m 一定, 相邻扫描线之间的延时差为:

$$\Delta\tau_{n,m} = \tau_{n+1,m} - \tau_{n,m}$$

$$= \frac{(m-1)d}{c} \left[\sin \frac{(n+1)\theta_{max}}{N} - \sin \frac{n\theta_{max}}{N} \right] \tag{4}$$

在我们提出的多波束同时合成法中, 是同时合成相邻扫描线, 因此, 寻求合理实现方法的途径应从分析 $\Delta\tau_{n,m}$ 入手。假设 θ_{max}

$= 45^\circ$, $N = 64$, $M = 64$, $d = 0.25\text{mm}$
 $c = 1540\text{m/s}$, 计算 $\Delta\tau_{n,m}$ 。表2中列出了第30号晶片的 $\Delta\tau_{n,m}$ 值, 其它号数的晶片的 $\Delta\tau_{n,m}$ 具有相同的特性。

从表2 我们可以看出, 对某一探头阵元 m , 当扫描线从1 变到64的过程中, $\Delta\tau_{n,m}$ 的值变化缓慢, 其值均接近于平均值:

$$\Delta\tau_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta\tau_{n,m} \tag{5}$$

因此, 我们可以采用 $\Delta\tau_m$ 来代替所有 $\Delta\tau_{n,m}$ 来进行相控延时。

$m = 30$

表 2 第30号晶片的 $\Delta\tau_{n,m}$ 值

平均值: 52.8ns

n	$\Delta\tau_{n,m}$	n	$\Delta\tau_{n,m}$	n	$\Delta\tau_{n,m}$	n	$\Delta\tau_{n,m}$	n	$\Delta\tau_{n,m}$	n	$\Delta\tau_{n,m}$
1	0.0	2	58.7	3	58.7	4	58.7	5	58.6	6	58.6
7	58.6	8	58.5	9	58.4	10	58.4	11	58.3	12	58.2
13	58.1	14	58.0	15	57.9	16	57.7	17	57.6	18	57.5
19	57.3	20	57.1	21	57.0	22	56.8	23	56.6	24	56.4
25	56.2	26	56.0	27	55.7	28	55.5	29	55.3	30	55.0
31	54.8	32	54.5	33	54.2	34	53.9	35	53.6	36	53.3
37	53.0	38	52.7	39	52.4	40	52.1	41	51.7	42	51.4
43	51.0	44	50.6	45	50.3	46	49.9	47	49.5	48	49.1
49	48.7	50	48.3	51	47.9	52	47.4	53	47.0	54	46.6
55	46.1	56	45.7	57	45.2	58	44.7	59	44.2	60	43.8
61	43.3	62	42.8	63	42.3	64	41.8				

2.2 多波束同时合成的实施方法

从上节分析中, 推导出采用 $\Delta\tau_{n,m}$ 的平均值 $\Delta\tau_m$ 代替 $\Delta\tau_{n,m}$ 来进行延时。为此设计出一种同时合成3 个波束的方法。在本方法中, 发射声束每隔3 条线发射1 次, 而同时接收发射方向及左右相邻方向的波束, 具体关系如表3 所示, 扇形线图如图2 所示。由于扇形是对称的, 表3 及图2 只示出了半个扇面。声束1, 4, 7…等仍按 $\theta_n = n\cdot\theta_{max}/N$ 的方向扫描, 而2, 3, 5, 6,

8, …等的扫描角度将不再按原来的等角增量变化, 详见下文及图4。

按此设计的多波束同时合成法的具体实施电路原理框图如图3 所示。

新方法的延时由在主延时的基础上加两级固定的附加延时组成。对某一探头阵元 m , 其主延时为:

$$\tau_m = \tau_{n,m} - \Delta\tau_m \tag{6}$$

$\Delta\tau_m$ 为固定的附加延时, 表4 为不同阵元的附加延时值。

表 3 发射、接收声束对照表

发射声束	1	4	7	10	13
接收声束	1, 2	3, 4, 5	6, 7, 8	9, 10, 11	12, 13, 14
发射声束	16	19	22	25	28
接收声束	15, 16, 17	18, 19, 20	21, 22, 23	24, 25, 26	27, 28, 29
发射声束	31	34	37	40	42
接收声束	30, 31, 32	33, 34, 35	36, 37, 38	39, 40, 41	42, 43, 44
发射声束	46	49	52	55	58
接收声束	45, 46, 47	48, 49, 50	51, 52, 53	54, 55, 56	57, 58, 59
发射声束	61	64			
接收声束	60, 61, 62	63, 64			

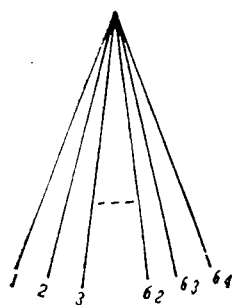


图 2 扇形线图

在图 3 中, 每路有三个延时输出头, 它们分别送入相应的加法器就得到所需的合成波束。从图 3 及表 4 可以看出, 对某一探头阵元, 在整个扇形扫描范围内, $\Delta\tau_m$ 的值固定不变而且延时量很小, 从相控延时的角度来说, 几乎不增加成本; 虽然波束形成后的放大、动态压缩及 A/D 变换等一系列工作也是三路并行的, 但在相控阵超声成像设备中, 此部分的电路比较小, 因此不会造成较大的

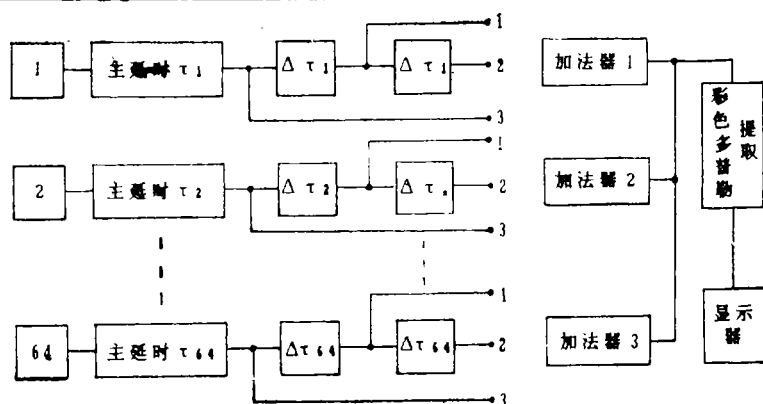


图 3 多波束同时合成实施原理图

影响, 所以该方法是切实可行的。图 3 中, 由每一阵元延时抽头 1 输出在加法器 1 中合成的声束是原始束, 仍按 $\theta_n = n \cdot \theta_{max} / N$ 分布, 设为 θ_1' , 延时量为 $\tau_{n,m}$; 由每一阵元延时抽头 2 输出在加法器 2 中合成的声束设为 θ_2' , 延时量为 $\tau_{n,m} + \Delta\tau_m$; 由每一阵元延时抽头 3 输出在加法器 3 中合成的声束设为 θ_3' , 延时量为 $\tau_{n,m} - \Delta\tau_m$ 。

2.3 扫描方向角的计算

表 4 不同阵元 $\Delta\tau_m$ 值

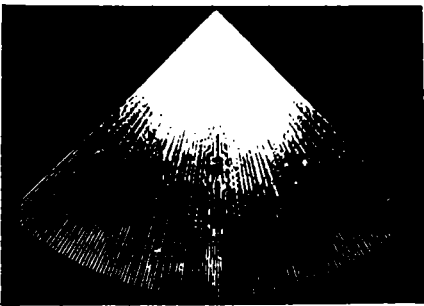
m	$\Delta\tau_m$	m	$\Delta\tau_m$	m	$\Delta\tau_m$	m	$\Delta\tau_m$	m	$\Delta\tau_m$	m	$\Delta\tau_m$
1	0.0	2	1.8	3	3.6	4	5.5	5	7.3	6	9.1
7	10.9	8	12.8	9	14.6	10	16.4	11	18.2	12	20.0
13	21.9	14	23.7	15	25.5	16	27.3	17	29.2	18	31.0
19	32.8	20	34.6	21	36.4	22	38.3	23	40.1	24	41.9
25	43.7	26	45.6	27	47.4	28	49.2	29	51.0	30	52.8
31	54.7	32	56.5	33	58.3	34	60.1	35	62.0	36	63.8
37	65.6	38	67.4	39	69.2	40	71.1	41	72.9	42	74.7
43	76.5	44	78.3	45	80.2	46	82.0	47	83.8	48	85.6
49	87.5	50	89.3	51	91.1	52	92.9	53	94.7	54	96.6
55	98.4	56	100.2	57	102.0	58	103.9	59	105.7	60	107.5
61	109.3	62	111.1	63	113.0	64	114.8				

扇形扫描线方向角的计算公式为:

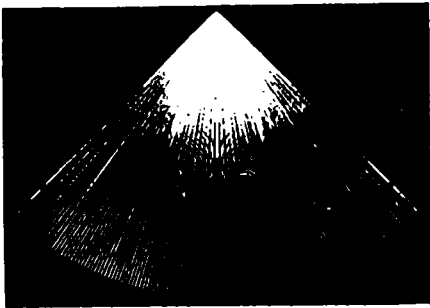
$$\theta = \sin^{-1}(c \cdot \tau_i / d) \quad (7)$$

τ_i 为相邻两阵元的延时差。即要求任意相邻两阵元的延时差相等,方可用公式(7)计算扫描角。如果要用公式(7)计算 θ_2' 及 θ_3' 应有 $(\tau_{n,m} + \Delta\tau_m) / (m - 1)$ 及 $(\tau_{n,m} - \Delta\tau_m) / (m - 1)$ 与 m 无关。由公式(3), (4), (5)

可知上述关系满足,因此,可以利用公式(7)计算 θ_2' 及 θ_3' 。图4为等角间隔扫描与新法扫描的扇形扫描图。由图4可见,大约在 $\pm 35^\circ$ 范围内,两种扫描图几乎没有区别;只是在扇形的两边略有区别,可见两种扫描图基本一致。



(a) 等角扇形扫描图像



(b) 新法扇形扫描图像

图4 两种方法的扇形扫描图像比较

3. 结论

综上所述,本文所提出的提高帧频的新声学技术

方法是切实可行的,它可将帧频提高3倍,所得扫描图像与传统扫描方式基本一致,因而对提高彩色多普勒血流成像的速度与质量具有一定的意义。