

# 相控阵超声二维稀疏阵列的优化设计应用研究

杨 平<sup>1†</sup> 施克仁<sup>2</sup>

(1 中国计量科学研究院 北京 100013)

(2 清华大学机械工程系 北京 310012)

**摘要** 在相控阵超声检测中，稀疏阵列是利用较少阵元数目获得大阵列孔径的有效办法。目前一些稀疏阵列设计的方法，并没充分利用有效阵元。本文首先采用遗传算法设计二维稀疏阵列，发现遗传算法设计的稀疏阵列，一致性较差。主要原因是在没有任何限制的条件下，寻优搜索空间大，遗传算法参数往往难于控制。针对此问题，受十字形稀疏阵列和最小冗余度阵列的启发，本文将最小冗余度阵列拓展到二维稀疏阵列的设计中。计算机模拟和实验都表明，利用最小冗余度阵列和遗传算法设计的二维稀疏阵列具有很好的空间分辨率和对比度分辨率。

**关键词** 相控阵超声，二维稀疏阵列，遗传算法，最小冗余度阵列

## A novel method to design 2D sparse array for ultrasonic phased array

Yang Ping<sup>1</sup> Shi Ke-Ren<sup>2</sup>

(1 National Institute of Metrology, Beijing 100013)

(2 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Sparse array is an effective way to enlarge aperture and enhance spatial resolution. The popular methods of designing sparse array can not supply the best array configuration. In this article, 2D sparse arrays are designed firstly by Genetic algorithm. But sparse array designed only by Genetic algorithm have bad consistency probably because the searching space is too huge and parameters of Genetic algorithm can not be perfectly controlled. Borrow the idea from mill-cross sparse array and the MRLA-Minimum-Redundancy Linear Array, a new method is put forward to design the 2D sparse array. Both simulation and experiment confirm the effectiveness of this combined method.

**Key words** Ultrasonic phased array, 2D sparse array, Genetic algorithm, MRLA-Minimum-redundancy linear array

2006-01-20 收稿； 2006-07-28 定稿

作者简介：杨平（1976-），男，山东烟台人，助理研究员，博士，研究方向：超声无损检测、声学计量。

施克仁（1938-），男，教授，博士生导师。

† 通讯联系人 E-mail: yangp@nim.ac.cn

## 1 引言

相控阵超声检测由于能够通过高效的电子扫查, 动态聚焦, 动态变迹等技术, 有效地提高超声检测的时间, 空间和对比度分辨率, 是目前超声检测研究的热点。国外在上世纪 90 年代左右, 超声相控阵技术广泛地应用到医学和工业检测中。Duke 大学 Stephen W. Smith 教授等在上世纪 80 年代末开始研究二维阵列的三维成像, 1991 在世界上第一次利用相控阵二维阵列实现三维成像<sup>[1,2]</sup>。此后的问题主要集中在稀疏阵列的设计<sup>[3,4]</sup>, 相位校正, 波束形成等问题。国内在上世纪 90 年代开始研究数字超声相控阵技术, 先后经历了硬件系统的设计, 一维阵列相控阵成像以及相位校正等阶段。

相控阵系统中, 提高分辨率一般是靠提高阵元的频率或增大阵列孔径来实现的。但是, 过高的频率会造成超声在介质中衰减过大和数据量增大; 所以增大阵列孔径是提高分辨率最有效的手段之一。若单靠增加独立通道数来增大孔径, 势必大大增加相控阵系统的复杂程度。上世纪 90 年代中期, 国际上在医学超声领域出现了研究稀疏阵列的热潮, 其目的是在不增加或增加很少独立通道数的情况下, 增大阵列的孔径, 从而提高检测系统分辨率。在医学超声领域, 稀疏阵列研究的代表人物有: 美国的 Lockwood, 其提出利用有效孔径方法来设计周

期型稀疏阵列<sup>[5]</sup>, 其设计方法简单。但周期型方法以及别的方法所设计的稀疏阵列, 其性能并没有达到最优。也就是说, 没有充分利用现有的独立通道数目。稀疏阵列的优化设计, 一直是阵列设计中的热点。对于稀疏阵列的设计, 一般来说有 3 种设计思路: (1) 阵元位置一定, 优化权系数; (2) 权系数一定, 优化阵元的位置; (3) 同时优化阵元位置和权系数。本论文设计的阵列应用于脉冲发射的相控阵系统, 故采用第二种设计思路, 仅优化阵元的位置。

## 2 二维方形阵列和圆形阵列的性能比较

在模拟参数: 阵元频率 (2 MHz)、大小 (1.3 mm × 1.3 mm)、数目、间距 (0.1 mm) 以及聚焦深度 (100 mm), 介质声速 (6000 m/s) 等相同情况下, 比较仅在阵列分布不同情况下的圆形阵列和方形阵列的性能。一般来说, 阵元数目接近的规则的圆形阵列跟方形阵列可能没有相同的阵元数 (差别很少), 此时去掉阵元数较多的阵列中的部分阵元, 使得两者阵元数目相同。

本文采用 Jørgen Jensen Arendt 提出的基于空间冲激响应的脉冲场模型及其声场仿真模型来分析计算阵列的脉冲回波响应<sup>[7]</sup>。对参考阵列、优化设计稀疏阵列的声学特性进行评价模拟。表 1 是阵元数目分别为 49, 81, 121 的

表 1 阵元数目一定情况下, 方形阵列和圆形阵列性能比较

阵元数目和阵列形式	$(\theta_0, \Phi_0) = (0^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (10^\circ, 10^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (15^\circ, 15^\circ)$			
	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL
	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB
49 圆形	4.8	6.9	9.8	-47.2	4.9	6.9	9.3	-22.6	4.6	6.5	10.0	-15.6
	4.8	7.1	9.8	-46.4	5.2	7.3	10.1	-20.3	6.0	8.4	11.6	-14.6
81 圆形	4.0	5.6	7.8	-50.1	4.0	5.5	7.9	-23.9	4.0	5.8	8.1	-15.6
	4.1	5.8	8.2	-46.9	4.3	5.8	8.4	-21.9	4.5	5.9	8.6	-15.1
121 圆形	3.0	4.2	6.0	-52.2	3.0	4.3	6.2	-24.3	3.1	4.4	6.2	-15.7
	3.2	4.5	6.2	-52.0	3.3	4.6	6.3	-22.2	3.3	4.6	6.4	-15.2
方形												

-3 dB, -6 dB, -12 dB 分别表示 -3 dB, -6 dB, -12 dB 主瓣宽度, 在  $\Phi_0=0$  的平面内测量。MSL-Max side-lobe 最高旁瓣。下同。

圆形和方形阵列(图1所示)在不同偏转角度情况下的声场性能。可以看出,对于阵元数目相同的阵列,圆形阵列具有更窄的主瓣宽度和更低的最高旁瓣;尤其是在偏转角度较大的时候,这种优势更加明显。其原因可能是圆形阵列有着更好的空间对称性,从而在不同的偏转角度时,其性能比较一致。后续二维稀疏阵列的研究,都是建立在圆形阵列基础上的稀疏。二维阵列的坐标系统如图2所示,  $\theta_0$  和  $\Phi_0$  分别是空间中某点偏离阵列中心  $z$  轴和  $x$  轴的角度。

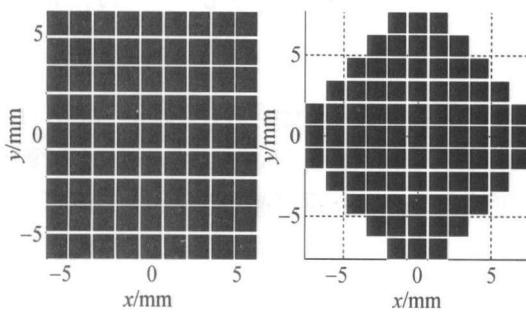


图1 具有相同阵元数目的方形阵列和圆形阵列  
(81阵元)

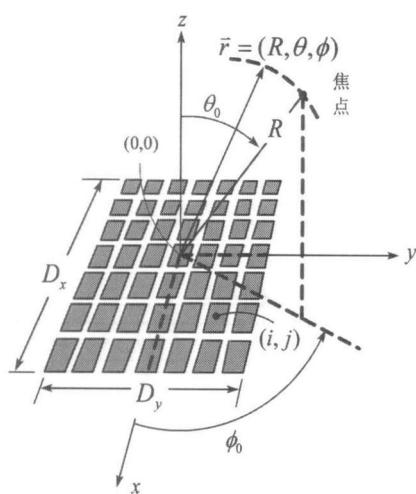


图2 二维换能器阵列及其所在坐标系统示意图

### 3 二维稀疏阵列的优化设计

本文稀疏阵列的研究,是基于阵元数目为129的圆形阵列(下文称之为参考阵列),如图3(a)所示。该阵列具有很好的性能。如表3第4行所示。即使在偏转角度较大时,仍具有较低的旁瓣和较窄的主瓣。后续稀疏阵列设计的目标就是使稀疏阵列的性能接近参考阵列的性能。

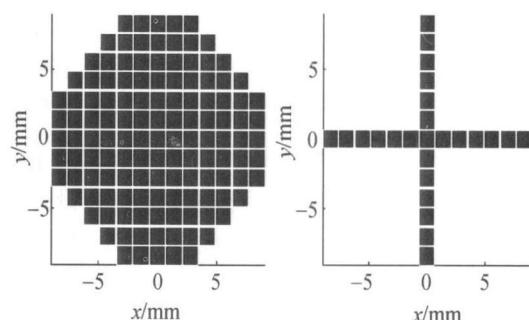


图3 阵元数目为129的圆形阵列和的相同孔径的十字形稀疏阵列

#### 3.1 十字形阵列的性能

十字形稀疏阵列,如图3(b)所示,在二维稀疏阵列研究的开始,得到一定的应用。图3(b)所示阵列的性能如表2所示( $\times \times$ :由于旁瓣已经高于12 dB,12 dB主瓣宽度已经没有意义)。模拟参数同上文所述。

跟图3(a)所示的满阵相比,十字形稀疏阵列的空间分辨率和对比度分辨率都比较低。

#### 3.2 遗传算法设计二维稀疏阵列

稀疏阵列的设计,实际上是从不同组合中取优的过程。本文以在阵元位置数目为129的圆形阵列上设计有效阵元数目为49的稀疏阵列为例。其可能的组合数目为 $1.1427 \times 10^{36}$ 个,如何从如此庞大的组合数目中选取较好的方案,是优化设计阵列的根本问题。

表2 十字形稀疏阵列的性能

阵列形式	$(\theta_0, \Phi_0)=(0^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0)=(10^\circ, 0^\circ)$			
	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL
十字形稀疏	4.2	6.0	$\times \times$	-11.6	4.2	6.1	$\times \times$	-9.4
参考阵列	3.1	4.4	6.2	-50.9	3.1	4.5	6.3	-23.8

Jørgen 提出过这样的方法: 随机产生 400 种选择, 即 400 个稀疏阵列, 通过人工比较这些阵列的声学特性, 选择出最优的阵列。该方法简单、直接, 但是离全局最优相差甚远而且费时。遗传算法 (GA-Genetic Algorithm) 是一类借鉴生物界遗传机制进行随机搜索的优化算法, 它能够在复杂而庞大的搜索空间中寻找最优解或准最优解。本文首先采用遗传算法来优化设计稀疏阵列。在该方法中, 选取稀疏阵列脉冲回波响应的主瓣特性和旁瓣特性作为优化目标, 通过构造适应度函数, 选择适当的遗传算子对阵元分布形式进行优化, 从而设计出最优的或者准最优的稀疏阵列。

在稀疏阵列的遗传算法设计中, 将每一个阵元对应于染色体中的一个基因, 基因的值为每个阵元的加权系数 (0 或 1), 然后将这个基因矩阵按行的顺序写成基因串, 从而实现从阵元

分布到染色体的映射, 即自然空间到遗传空间的映射。定义了染色体, 并构造了合适的适应度函数, 然后经过反复运用选择 (选择算子, 取 50%)、交叉 (交叉算子, 随机一点交叉)、变异 (变异算子, 随机一位变异, 变异概率 5%) 的遗传操作完成遗传空间的搜索, 从而找出  $Fit_{min}$  所对应个体 (遗传空间对应的染色体), 把这一个体译码回去, 即可得到优化的阵元分布。本文设计适应度函数为:  $Fit = k_1 \cdot ML + k_2 \cdot SL$ ,  $ML$  表示阵列脉冲回波响应的主瓣特性,  $k_1$  是主瓣特性的加权值;  $SL$  表示阵列的脉冲回波响应的旁瓣特性,  $k_2$  是旁瓣特性的加权值; 通过设定不同的  $k_1$  值和  $k_2$  值, 可实现不同的优化目标。一般认为在工业无损检测中, 由于缺陷跟周围介质声阻抗的差异较大, 所以对空间分辨率的要求高于对比度分辨率的要求。这里取  $k_1=2$ ,  $k_2=1$ 。参考阵列及稀疏阵列如图 4 所示。

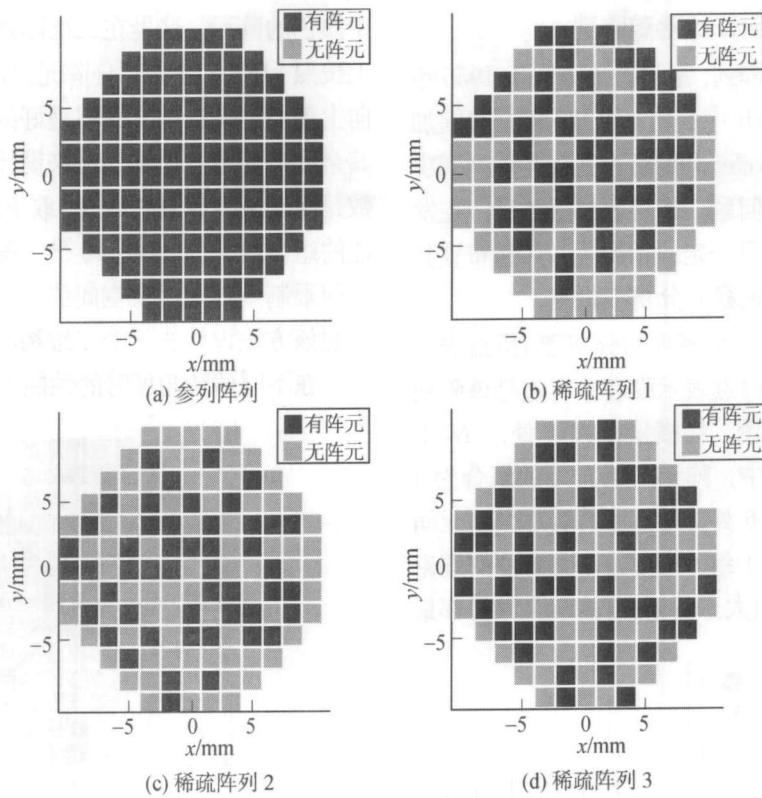


图 4 二维参考阵列和利用 GA 设计的 3 个二维随机稀疏阵列

利用遗传算法设计的二维稀疏阵列与 129 阵元圆形满阵性能比较如表 3 所示:

表 3 采用遗传算法设计的 3 个二维稀疏阵列与满阵性能比较

稀疏方案	$(\theta_0, \Phi_0) = (0^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (10^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (15^\circ, 15^\circ)$			
	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL
	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB
1	3.4	4.0	6.8	-31.7	3.6	4.8	6.8	-23.3	3.6	5.0	7	-15.1
2	3.9	5.5	7.9	-31.5	3.8	5.5	7.8	-21.7	3.9	5.6	7.9	-13.3
3	3.8	5.5	7.8	-30.5	3.9	5.8	8.1	-19.4	4.0	5.9	8.1	-12.2
参考阵列	3.1	4.4	6.2	-50.9	3.1	4.5	6.3	-23.8	3.2	4.5	6.4	-15.7

从表 1, 3 可以看出, 由 49 个阵元组成的圆形满阵阵列和由遗传算法设计的具有 49 阵元的二维稀疏阵列相比较, 稀疏阵列明显有着更好的性能指标。表现为主瓣宽度明显减小, 旁瓣水平略有提高。但是 3 个稀疏阵列的性能差别比较大, 尤其是主瓣宽度差别较大。与参考阵列的性能相比, 3 个稀疏阵列的性能仍差别较大。

### 3.3 最小冗余度阵列 (MRLA) 和遗传算法相结合的方法设计二维稀疏阵列

最小冗余度阵列, 最早由 Leech 于 1956 年在 J.London Math 中提出; 1968 年, 美国加州理工学院的 Moffet 利用最小冗余度阵列解决射电天文学中的问题。其问题的描述是: 在发射 / 接收装置数目一定的情况下, 如何布置其位置, 使得阵列观察的分辨率最高。

图 5 左边是一个阵列的分布图 (黑点表示该位置有阵元, 白点表示没有); 右边是该阵列的空间采样频率图, 在横坐标为 1 处,  $N=1$ , 意思是在该阵列中, 阵元间距为 1 的组合为 1 组, 在横坐标为 6 处,  $N=1$ , 其意思是阵元间距为 6 的组合为 1 组。按照最小冗余度的理论认为, 每种间距 (大于等于 1) 的组合数目都最

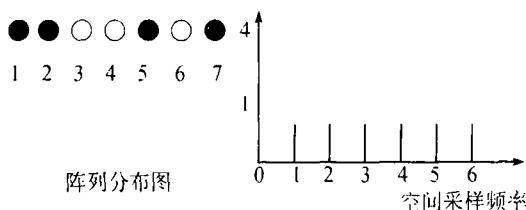


图 5 一维最小冗余度阵列及其空间采样频率

接近 1 时, 该阵列才做到冗余度最小。最小冗余度阵列是保证观测中不出现伪像而且做到孔径最大的阵列分布。

关于 MRLA 设的问题, 在文章 [6] 中有详细的介绍。利用 MRLA 设计的一维阵列具有很好的空间分辨率。受十字形阵列的启发, 在设计二维稀疏阵列的时候, 将 MRLA 拓展到二维阵列的情况。在二维阵列的几条平分线上 (图 6 黑虚线所示), 利用 MRLA 布置部分阵元, 图 6 中黑色的阵元。这里在二维阵列的四条平分线上上按照 MRLA 设计部分阵元, 使得在该 8 个方向上使用最少的阵元获得最好的空间分辨率, 其余的阵元按照遗传算法来设计, 设计目标函数是降低最高旁瓣的高度, 取  $k1=0$ ;  $k2=1$ 。可能的组合数目为  $2.00 \times 10^{29}$ 。搜索空间为没有任何限制条件下搜索空间的 500 多万分之一。按照该方法设计的三个二维稀疏阵列如图 7 所示, 在不同偏转角度时的性能如表 4 所示。

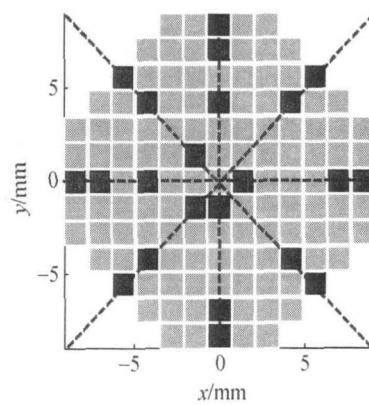


图 6 利用最小冗余度阵列设计二维稀疏阵列中的部分阵元

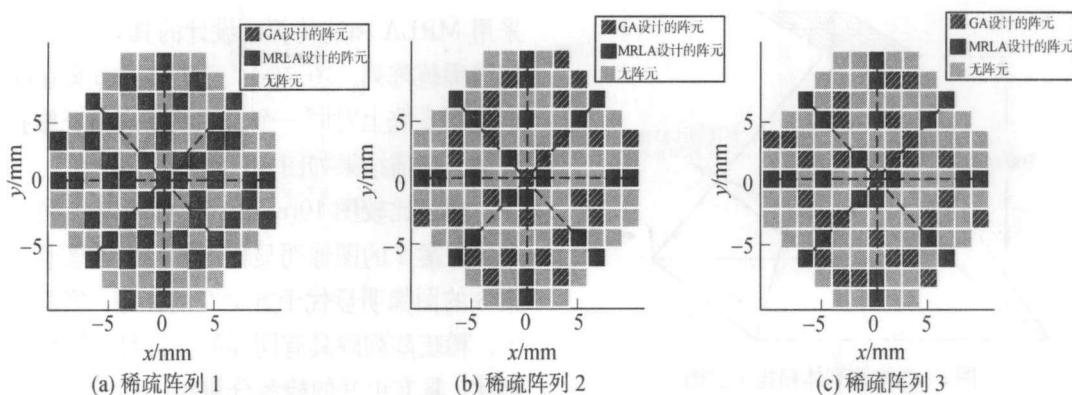


图 7 最小冗余度阵列 (MRLA) 和遗传算法相结合的方法设计的二维稀疏阵列

表 4 采用 MRLA 和遗传算法设计的 3 个二维稀疏阵列与满阵性能比较

稀疏方案	$(\theta_0, \Phi_0) = (0^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (10^\circ, 0^\circ)$				$(\theta_0, \Phi_0) = (15^\circ, 15^\circ)$			
	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL	-3dB	-6dB	-12dB	MSL
	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB	/°	/°	/°	/dB
1	3.2	4.6	6.4	-31.7	3.2	4.6	6.4	-23.6	3.2	4.7	6.5	-15.4
2	3.2	4.4	6.2	-28.8	3.1	4.4	6.2	-23.7	3.1	4.5	6.3	-15.5
3	3.2	4.5	6.3	-30.5	3.2	4.5	6.3	-22.4	3.2	4.7	6.4	-15.5
参考阵列	3.1	4.4	6.2	-50.9	3.1	4.5	6.3	-23.8	3.2	4.5	6.4	-15.7

比较表 3, 4 可以看出, 采用 MRLA 和遗传算法设计的二维稀疏阵列与仅采用遗传算法设计的二维阵列相比, 有更好的一致性和性能, 其性能更接近于参考阵列。因为前者是在更小更好的样本空间中寻优, 结果更接近于最优解。

4 实验验证

本文所用相控阵实验系统是自行开发的，具有 64 独立通道；脉冲发射方式，发射电压为 150 伏；接收增益可调，每个通道动态范围为  $-20 \text{ dB} \sim +60 \text{ dB}$ 。系统结构如图 8 所示。

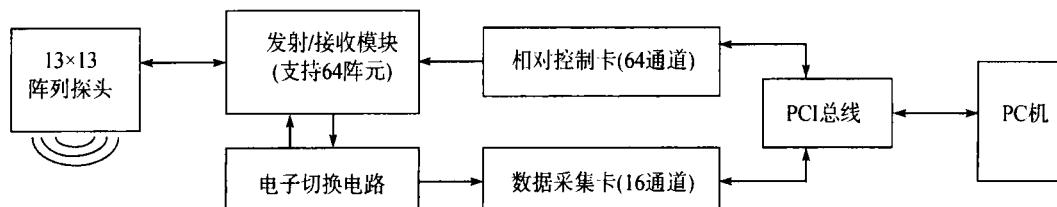


图 8 基于二维阵列的超声相控阵系统结构示意图

实验中所使用的参考阵列探头，其具体指标： $f=2\text{ MHz}$ ；数目  $13 \times 13$ ；阵元大小为  $1.3\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$ ；阵元间隙为  $0.1\text{ mm}$ ，阵元间距  $1.4\text{ mm}$ 。检测对象铝试块中距其上表面  $100\text{ mm}$ ,  $120\text{ mm}$  处有两个直径为  $3\text{ mm}$  的规则通孔。二维阵列探头放置在铝试块的上表面。对其下面的金字塔形空间进行扫描。每条扫描线的发射和接收焦点都为  $100\text{ mm}$ ，扫描线的步长为  $1^\circ$ ，既完成一个三角形切面（偏转角度为

$\pm 15^\circ$ ) 需要的扫描线数目为 31 条; 完成整个体扫描所用的扫描线数目为  $31 \times 31 = 961$  条。每条扫描线, 都是 64 阵元发射, 64 通道接收后, 按照需要聚焦的几何位置进行延迟叠加后所得到的数据。在波束合成中, 设计了 FIR 低通滤波器, 对每路信号起到滤波和检波的作用。经过 FIR 滤波, 64 路信号叠加后形成一条射频线。选定 3 个阵列方案, 方案 1(49 个阵元的圆形满阵阵列, 图 4(a)); 方案 2(在参考阵列基础

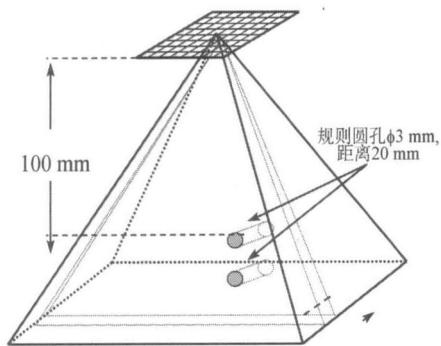


图9 二维阵列体扫描示意图

上，采用遗传算法设计的具有49阵元的二维稀疏阵列，图4(b)); 方案3(在参考阵列基础上，

采用MRLA和遗传算法设计的具有49阵元的二维稀疏阵列，图7(a)。三个阵列方案在同一个检测系统上对同一个人工缺陷进行三维扫描成像。扫描结果如图10所示。

通过比较图10(a)、10(b)、10(c); 可以看到：方案2的图像明显优于方案1的图像；方案3的图像明显优于方案2的图像。实验证明了，稀疏阵列跟具有同样阵元数目的满阵列相比，具有更好的检测分辨率；而利用MRLA和遗传算法设计的阵列比仅利用遗传算法设计的阵列具有更好的一致性和性能。

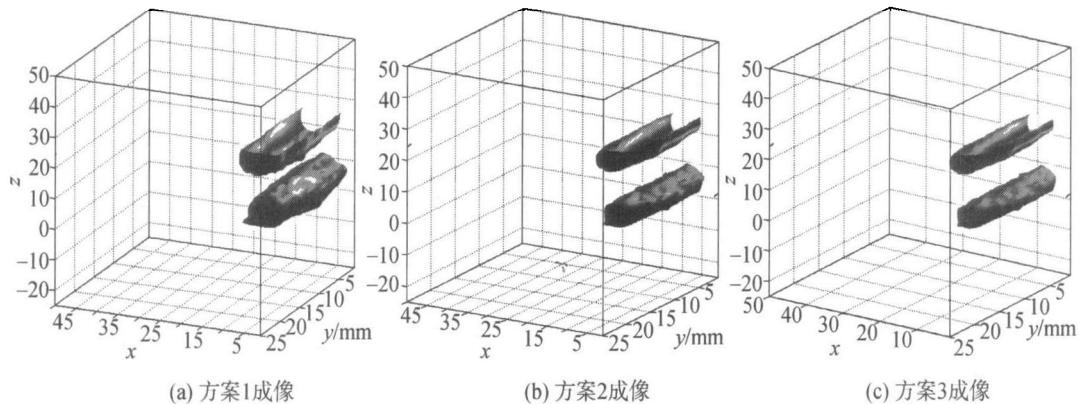


图10 参考满阵以及稀疏阵列成像结果

## 5 结论

通过计算机模拟推出，具有相同阵元数目的圆形满阵的性能优于方形满阵的性能。二维稀疏阵列设计中，利用遗传算法设计的稀疏阵列的性能明显优于相同阵元数目的圆形满阵的性能；但是，遗传算法设计的二维稀疏阵列，其性能和一致性都较差；基于此问题，又提出利用最小冗余度阵列和遗传算法相结合的方法来设计二维稀疏阵列，计算机模拟和实验都证明了该方法设计的阵列具有更好的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Stephen W. Smith, Henry G. Pavy, Jr. et al. High-Speed Ultrasound Volumetric Imaging System—Part I: Transducer Design and Beam Steering. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1991, 38, No(2): 100–108
- [2] Olaf T. von Ramm, Stephen W. Smith, Henry G. Pavy, et al. High-Speed Ultrasound Volumetric
- [3] Andrea Austeng , Sverre Holm. Sparse 2-D Arrays for 3-D Phased Array Imaging—Design Methods. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2002, Vol. 49: 1073–1086
- [4] Stephen W. Smith, Warren Lee, Edward D. Two Dimensional Arrays for 3D Ultrasound Imaging. 2002 IEEE Ultrasonics Symposium 1545–1553
- [5] Geoffrey R. Lockwood . Optimizing the Radiation Pattern of Sparse Periodic Linear Arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1996, Vol. 43, 7–14
- [6] Ping Yang, Bin Chen, Ke-ren Shi. A novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array. *Ultrasonics*, 44(2006): e717–e721.
- [7] Jensen J A. A model for the propagation and scattering of ultrasound in tissue. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, 89(1): 182–190