

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.013

# 基于凸优化算法的水声传感器阵列综合\*

李文强<sup>1,2,3</sup> 李鹏<sup>1,2,3</sup> 姜路<sup>1,2,3</sup> 蒋威<sup>1,2,3</sup> 李剑乔<sup>4</sup>

(1. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 江苏省气象传感网技术工程中心 南京 210044; 3. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044; 4. 南京邮电大学 电子科技与工程学院 南京 210003)

**摘要:**稀疏基阵成像技术已在水下探测领域广为研究。针对稀疏基阵的分布特性带来的波束旁瓣电平升高、成像对比度降低等问题,提出一种基于加权范数最小化的阵列综合方法用于水下超声传感器阵列,设定目标函数及约束条件,进行多次的迭代,同时优化阵元位置与阵元激励,最后将 $20 \times 20$ 的面阵综合优化成51个阵元的稀疏基阵,旁瓣电平在 $-15$  dB以下,并将凸优化阵列综合得到的稀疏基阵的波束图与切比雪夫阵列综合得到的波束图性能进行比较,且进行成像仿真,结果表明,采用凸优化获得的基阵在保证成像质量的同时,可以大幅减少发射阵元的数目,降低系统复杂性,并获得预期的旁瓣电平。

**关键词:**稀疏基阵;水下成像;凸优化;阵列综合

**中图分类号:** TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Underwater acoustic sensor array synthesis method based on convex optimization algorithm

Li Wenqiang<sup>1,2,3</sup> Li Peng<sup>1,2,3</sup> Jiang Lu<sup>1,2,3</sup> Jiang Wei<sup>1,2,3</sup> Li Jianqiao<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Meteorological Sensor Network Technology Engineering Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** At present, sparse arrays have been widely used in the field of underwater acoustic imaging. Aiming at the distribution characteristics of sparse array raising the sidelobe level, reducing the imaging contrast and other issues, a kind of underwater acoustic sensor array synthesis method based on convex optimization algorithm is proposed. On the basis of the appropriate object function, this method makes multiple iteration operations on the planar array, and optimizes the position of the array element and the element excitation. Finally, the planar array of  $20 \times 20$  elements is optimally integrated into sparse array of 51 elements, the sidelobe lever is under  $-15$  dB. By comparing the beam pattern performance based on convex optimization algorithm with the Chebyshev arrays synthesis method, the results show that the sparse array optimized in this study not only ensures the imaging quality, but also significantly reduces the number of array elements, and reduces sidelobe level. In addition, it decreases the complexity of the system and the design cost.

**Keywords:** sparse array; underwater acoustic imaging; convex optimization; array synthesis

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

\* 基金项目:江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2015692)、国家自然科学基金(41075115)、江苏省第11批六大高峰人才项目(2014-XXRJ-006)资助

## 0 引言

在水下正视声学成像中,稀疏基阵成像技术已在水下探测领域广为研究<sup>[1]</sup>。现阶段超声成像系统大多数都是采用多阵元的传感器基阵,为了使成像具有更高的分辨率以及更快的成像速率,传感器基阵的阵元数目不断增多和阵列孔径越来越大,导致通道数目增多、系统复杂、体积庞大及制造成本高<sup>[2-3]</sup>,然而,一个大型的传感器阵列在应用方面会受到很大的限制<sup>[4]</sup>。因此,单纯地从增加阵元数目和阵列孔径来获得预期的波束和在实际应用中有着很大的限制。于此,稀疏基阵应运而生,通过将传感器阵元稀疏布置,扩大阵元间的间距,此方法不仅大幅减少了所需的阵元,避免了阵元间的互耦效应,降低了计算复杂度与设计成本而且保证了阵列的分辨率。

在过去的数十年,已经出现了很多阵列综合的方法,像切比雪夫方法和泰勒方法<sup>[5]</sup>,是传感器阵列获得窄波束和低旁瓣的重要综合方法,不过这两种方法主要应用在密集的线性均匀阵列,所以不能进行对阵列的稀疏优化。为了得到较低的旁瓣电平,大型阵列是很难被稀疏的。遗传算法通常都是调整周期阵列中的某一些阵元来降低与之相对应的旁瓣电平,虽然可以适用于稀疏阵列综合,但是该方法不能满足一定的收敛性和计算量<sup>[6]</sup>。一种新型的基于滤波对角化(FDM)的非迭代方法被提出来,其可以用在线性和平面阵列综合中使所需阵元大大减少,该方法可以有效地重构期望的波束方向图,但随之而来的运算量明显提高<sup>[7]</sup>。粒子群算法属于自然算法,为了得到更期望的阵列,就必须不断地寻优,带来的计算量比较大,且其收敛速度相对较慢<sup>[8]</sup>。

以上方法都是用于表示非凸优化问题,它们普遍存在的问题就是收敛性得不到保证,此外,在全局优化方法中计算量也是需要重点考虑的。同时存在的问题是,阵列的稀疏布置往往使得波束方向图的旁瓣电平升高,使成像的对比度降低,而稀疏阵列综合可以根据预期的波束效果,设定相应的约束条件进行综合,来优化出满足波束效果的阵元位置及阵元激励<sup>[9]</sup>。因为稀疏阵列模型与稀疏信号在空间上的离散、稀疏分布等方面相似,于此,设想将稀疏信号重构算法<sup>[10]</sup>在稀疏阵列综合上实现。凸优化阵列综合能够实现性能良好的波束方向图的设计,并且使满足最小峰值旁瓣电平(PSL)的传感器数量尽可能的少<sup>[11]</sup>。涂光鹏等人<sup>[12]</sup>为了避免 NP 难问题的求解,提出使用  $\ell_1$  加权范数替代  $\ell_0$  范数的方法,通过复数求导结合启发式近似方法对阵元位置、阵元激励进行优化,得到一个与期望值近似的稀疏阵列。Cen 等人<sup>[13]</sup>提出一种基于  $\ell_1$  范数最小化的方法,对线性阵列进行阵元位置与相应的权值进行优化,得到最大稀疏度的阵列,该

方法可以有效地降低计算复杂度和抑制峰值旁瓣电平,并提高了空间分辨率。Prisco 等人<sup>[14]</sup>提出一种基于迭代  $\ell_1$  范数最小化的方法,利用多次迭代凸优化方法来实现阵列的优化,从而进一步获得更加稀疏的传感器阵列。对于水下超声传感器基阵的稀疏优化,本文提出了凸优化阵列综合方法,对阵元位置、阵元激励进行优化,降低波束旁瓣电平,且保证波束性能。

## 1 凸优化阵列综合方法

### 1.1 稀疏阵列模型

通常来说,传感器阵列可以根据相邻阵元间距分为两类,一类是等间距排布的均匀阵列(周期阵),另一类是不等间距排布的非均匀阵列(非周期阵)。本文参考的稀疏阵列模型是一种从规则的栅格中按一定的稀疏度去掉一些传感器阵元或接匹配负载而形成的阵列,所有阵元必须是在栅格点上取得,因此稀疏阵列阵元的间距应是最小阵元间距的整数倍。这种稀疏基阵的设计增大了孔径,波束主瓣变窄,提高了空间分辨率等,已被广泛应用于雷达、电子通信、以及水下声学成像等领域<sup>[15]</sup>。

平面阵列如图 1 所示,图中黑色点元表示声学传感器单元。假设声学传感器阵列中的阵元都是各向同性的,阵元分布在  $XOY$  平面内,共有  $M \times N$  个网格节点,在网格节点上放置超声传感器阵元, $X$  方向的节点间距表示  $d_x$ , $Y$  方向的节点间距为  $d_y$ 。 $\theta$  表示声波的俯仰角, $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ , $\varphi$  表示声波的方位角, $\varphi \in [0, 2\pi]$ 。二维平面阵列的导向矢量  $\mathbf{A}$  和激励矢量  $\mathbf{w}$  分别表示如下:

$$\mathbf{A} = [a_{11} \cdots a_{1N} \cdots a_{M1} \cdots a_{MN}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{w} = [w_{11} \cdots w_{1N} \cdots w_{M1} \cdots w_{MN}]^T \quad (2)$$

式中:  $[\cdot]^T$  表示矩阵转置。 $a_{mn} = e^{-jk(md\mu + nd\nu)}$  是阵列单元  $(m, n)$  的方向图 ( $m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1$ ),  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  为发射信号波长),  $\mu$  和  $\nu$  是方向参数,分别为  $\mu = \sin\theta\cos\varphi$  和  $\nu = \sin\theta\sin\varphi$ ,其取值范围分别为  $\mu \in [-1, 1]$  和  $\nu \in [-1, 1]$ ;  $w_{mn}$  是第  $(m, n)$  个位置上声学传感器阵元的加权值。则二维平面阵列的方向图可表示为:

$$F(\mu, \nu) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w_{m,n} e^{jk(md\mu + nd\nu)} = \mathbf{A}^H(\mu, \nu) \mathbf{w} \quad (3)$$

由式(3)可知,二维面阵的波束方向图由导向矢量转置与激励矢量相乘求得,导向矢量与面阵的阵元数、阵元位置、阵元间距决定,所以波束方向图的性能就是由这 3 个参数和激励加权决定<sup>[16]</sup>。

因此,阵列综合的过程就是一个参数寻优的过程,包括加权幅值和阵元位置(被优化基阵的阵元数和阵元间距是已知的),来满足期望的波束方向图。

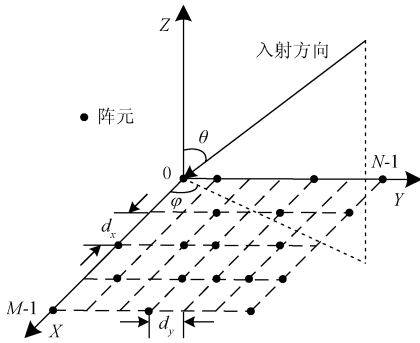


图1 平面稀疏阵列的结构

Fig.1 Structure of planar sparse array

1.2 凸优化算法阵列综合

若所设定目标函数是凸函数,且目标函数的变量的取值范围也为凸集,则可以将其视为凸优化问题,凸优化的一个优点就是如果存在局部最优解,那么这个解就是目标函数的全局最优解<sup>[17]</sup>。此外,凸优化问题能通过非常有效的数值方法来解决,比如内点法(interior-point method)<sup>[17]</sup>。本文将阵列综合的问题表示成凸优化形式的问题:

$$\begin{aligned} & \min f_1(x) \\ & \text{s. t. } f_i(x) < b_i \quad i = 2, 3, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $x \in R^N$ , 函数  $f_i$  为  $R^N \rightarrow R$  的凸函数。凸函数需要满足条件:

$$\begin{aligned} f_i(\alpha x + (1 - \alpha)y) & \leq \alpha f_i(x) + (1 - \alpha)f_i(y) \\ 0 & \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

在给定的约束条件:二维平面阵列稀疏度和峰值旁瓣电平,其中,阵列的稀疏度通过  $\ell_1$  加权范数计算得出,传感器阵列通过移除加权值近似等于0的阵元(通过设置加权阈值),得到最理想的阵元位置和相应的阵元加权值。

本文采用的加权  $\ell_1$  范数<sup>[18]</sup>优化的阵列模型表示如下:

$$\begin{aligned} & \min_w \|Qw\|_1 \\ & \text{s. t. } A^H(\mu_0, v_0)w = 1 \\ & A^H(\mu, v)w < psl \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $Q$  是由加权系数  $q_k$  组成的1-范数加权矩阵;  $\mu$  和  $v$  是方向参数,分别为  $\mu = \sin\theta\cos\varphi$  和  $v = \sin\theta\sin\varphi$ ,  $\Omega$  表示平面阵列的波束旁瓣区域;  $\mu_0$  和  $v_0$  表示波束主瓣的指向;  $psl$  表示期望的最大峰值旁瓣电平。

$$\begin{aligned} Q & = \text{diag}(q^{(l-1)}), \quad q_m^{(l+1)} = \frac{1}{|w_m^{(l)}| + \delta} \\ m & = 0, 1, \dots, M - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $w_m^{(l)}$  是第  $l$  次迭代时阵列的激励向量估计值,在第1次迭代中即( $l = 0$ )时,  $w^{(l)}$  是全1的向量;  $\delta$  的值设

置成比期望的  $|w|$  值还要小的非零值,当  $|w|$  出现零值时,  $\delta$  进行补偿,以防算法失效。保证了算法运行的稳定性。当迭代次数  $l$  达到  $l_{\max}$  或者满足终止条件(8)和时平面阵列综合完成:

$$\|w^{(l)} - w^{(l-1)}\|_1 < \xi \quad (8)$$

式中:  $\xi$  为误差值。通过将求得的  $w$  跟加权阈值(设置为  $10^{-3}$ )进行比较,大于阈值时选择,小于阈值时去除,得到最终的加权矩阵来确定相应的阵元位置,  $w$  尽可能稀疏,即  $w$  中非零元素尽可能少<sup>[19]</sup>。

仿真设置初始化二维面阵的  $X$  方向阵元数  $M = 20$ ,  $Y$  方向阵元数  $N = 20$ , 相邻阵元间距  $d_x = d_y = \lambda/2$  (半波长),方位角和俯仰角都设置为  $0^\circ$ , 方向参数取值范围  $\mu \in [-1, 1]$ 、 $v \in [-1, 1]$ , 在其取值范围内的采样数设为  $L_\mu = L_v = 101$ , 约束条件为旁瓣电平小于  $-15$  dB, 误差最小值设为  $10^{-3}$ 。

仿真结果,凸优化阵列综合后阵元位置分布如图2所示,将  $20 \times 20$  的平面阵列稀疏优化成51个阵元的基阵,相比于优化前的阵列减少了349个阵元,稀疏率达到87.25%。

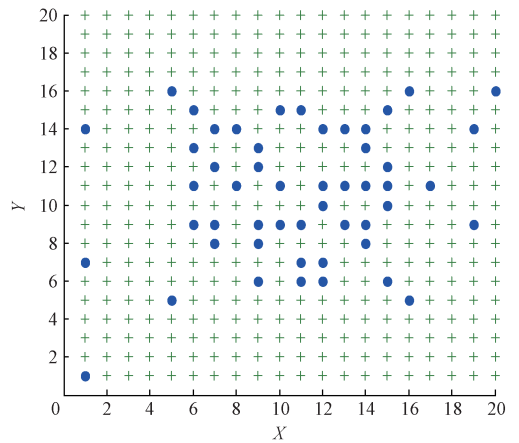


图2 综合优化后的阵元位置

Fig.2 Array elements locations after synthesis optimization

图3所示为目标点在相对于优化得到的稀疏基阵阵列中心位置时的三维波束图,图4表示平面阵列在  $(0^\circ, 0^\circ)$  指向时主旁瓣区域分布。

由图4可以看出,  $(0^\circ, 0^\circ)$  中心位置的方块区域波束强度最高,表示波束的主瓣区域,其他的黄色区域表示了波束的旁瓣区域,表明峰值旁瓣电平得到了抑制。

1.3 与切比雪夫阵列综合的比较

切比雪夫阵列综合法也能很好地进行旁瓣抑制,通常是在主瓣宽度的约束条件下得到最低的峰值旁瓣电平;或者是在峰值旁瓣条件的约束下获得最窄的主瓣宽度<sup>[20]</sup>,以上两种途径中的峰值旁瓣电平都是相等的,这一点与凸优化阵列综合得到的一样的。

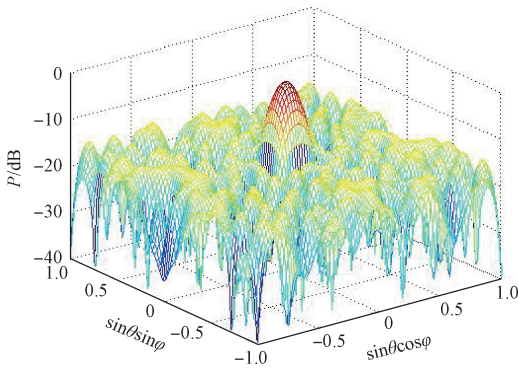


图 3 平面阵列(0°,0°)波束方向图

Fig.3 Beam direction of planar array (0°,0°)

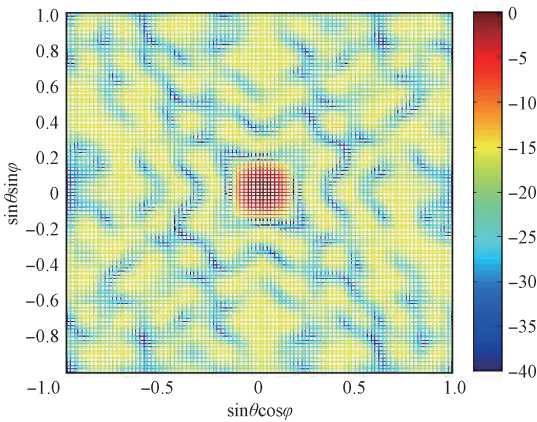


图 4 平面阵列(0°,0°)主旁瓣区域分布

Fig.4 Main and side lobe area distribution of planar array (0°,0°)

平面基阵的指向性函数是由行子阵的函数和列子阵的函数的乘积得到<sup>[21]</sup>。当方位角  $\varphi = 0^\circ$  的时候,就可以得到  $X$  轴向的线阵指向性函数,当  $\varphi = 90^\circ$  的时候,可以得到  $Y$  轴向的线阵指向性函数。本文对凸优化综合以后的阵列波束、切比雪夫方法形成的阵列波束以及未经过阵列优化的阵列波束进行了比较,如图 5 所示。

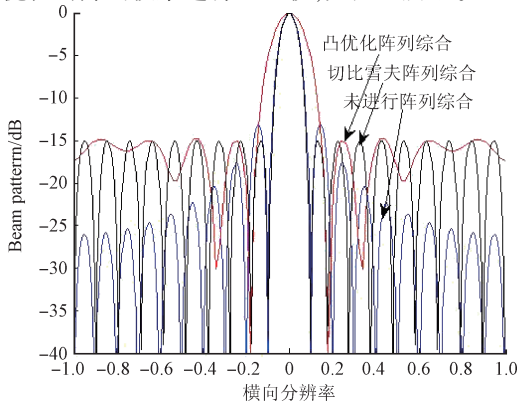


图 5 阵列波束的比较

Fig.5 The comparison of the beam patterns

如图 5 中箭头文本标注,蓝色线条表示未进行阵列综合  $X$  方向的波束,黑色线条表示切比雪夫阵列综合  $X$  方向的波束,红色线条表示本文凸优化阵列综合  $X$  方向的波束。仿真结果表明,未经过阵列综合得到的波束峰值旁瓣电平较高,切比雪夫阵列综合得到的波束峰值旁瓣电平和本文采用凸优化阵列综合得到的波束峰值旁瓣电平相同。

由表 1 对 3 种阵列波束性能的比较可知,前两种都未对阵元数目和位置进行优化,而本文方法将阵元数大幅减少;切比雪夫方法和本文方法都对波束峰值旁瓣电平起到了抑制作用,降低了 1.8 dB;对于主瓣宽度,本文方法略有下降,这是因为凸优化方法综合以后的稀疏基阵降低了峰值旁瓣电平,提高了对比度,大大减少了阵元数量,同时也牺牲了主瓣的宽度,但对于大范围的水下探测场景来说影响并不大,该阵列综合方法得到的稀疏基阵在水下超声成像方面的应用还是非常实用的。

表 1 阵列波束性能的比较

Table 1 The comparison of the array beam performance

	阵元数	旁瓣电平/dB	主瓣宽度
未综合	400	-13.2	5.7
切比雪夫	400	-15	5.7
本文方法	51	-15	9.2

上述根据凸优化方法得到的稀疏基阵,波束形成可以计算出其发射波束方向图,对于相同方向的回波,接收基阵不改变其阵元位置和相应的激励加权,归一化后,可以得到与发射基阵相同的接收波束方向图<sup>[22]</sup>。

前面所述的仿真都是声波在(0°,0°)时的波束,所以要将该方法阵列综合的稀疏基阵用于水下声学成像,其他方向得到的效果也要得到保证,以达到每个点目标的回波性能最佳。当目标点在(45°,45°)时,激励相位补偿后的接收波束结果如图 6~8 所示。

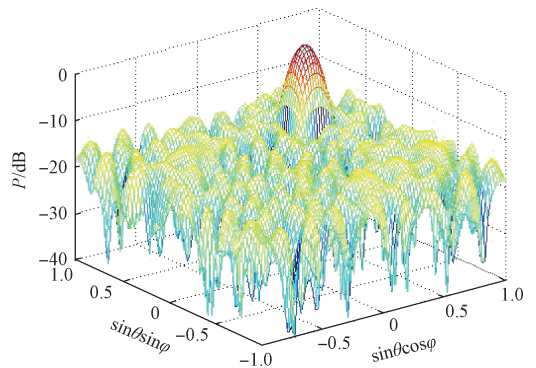


图 6 平面阵列(45°,45°)波束方向

Fig.6 Beam direction of planar array (45°,45°)

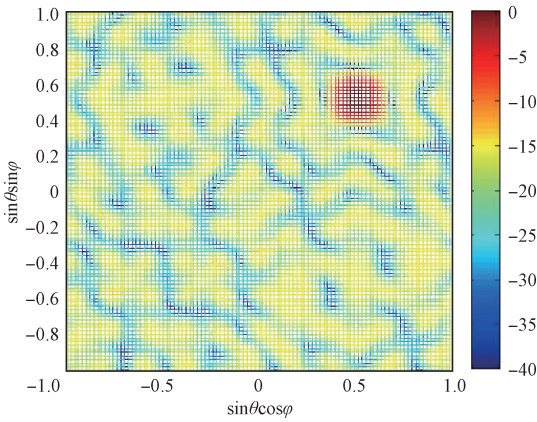


图7 平面阵列(45°,45°)主旁瓣区域分布  
Fig.7 Main and side lobe area distribution of planar array (45°,45°)

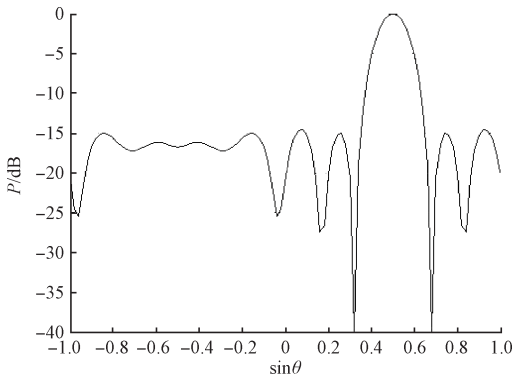


图8 目标点在(45°,45°)波束  
Fig.8 The beam pattern of target point in (45°,45°)

通过与图3、4比较可以看出:两个方向的波束图效果相似,主瓣波束宽度不变,旁瓣峰值电平都在-15 dB以下,旁瓣区域得到较好地抑制。结果表明,可以用该方法优化的阵列进行成像。

## 2 成像仿真

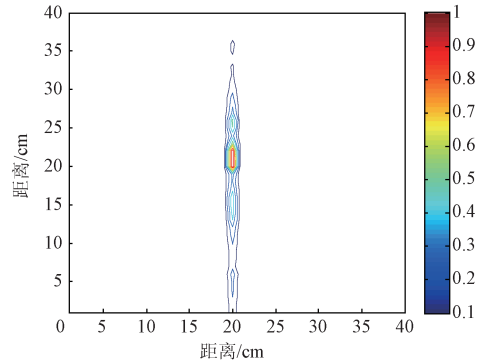
### 2.1 对点目标的仿真

第1节已经通过波束指向图分析了阵列的角度分辨率,为了验证上述阵列综合方法的距离分辨率,对点目标进行仿真。收发方式采用稀疏阵列的阵元逐一发射,且接收阵元同步接收对点目标的回波。发射信号采用线性调频波<sup>[23]</sup>,目的是提升系统的信噪比,仿真中参数设置为中心频率300 kHz,带宽为30 kHz。超声成像的距离分辨率取决于信号的带宽和超声波在水下环境的传播速度<sup>[24]</sup>:

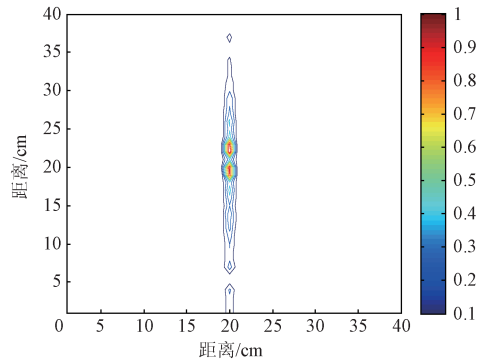
$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (9)$$

式中: $c$ 表示超声波传播速率,设置为1500 m/s, $B$ 为线性调频信号的带宽。

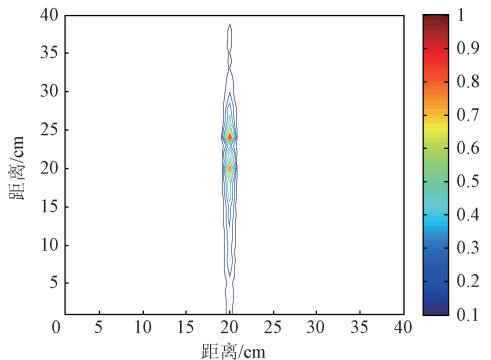
仿真中设置点目标距离稀疏基阵中心位置0.5 m,同时,系统的采样率设为2 MHz。仿真3组点目标,两点目标的间距设置了3个值,如图9所示,分别是2、3、4 cm。结果表明,图9(a)不能区分两点目标,图9(c)可以明显区分两点目标,图9(b)正好能区分两点目标。距离分辨率为3 cm符合式(9)得出的理论值。



(a) 点目标间距2 cm  
(a) The distance of point target 2 cm



(b) 点目标间距3 cm  
(b) The distance of point target 3 cm



(c) 点目标间距4 cm  
(c) The distance of point target 4 cm

图9 不同间距的两个点目标仿真

Fig.9 Simulation of different distance of two points targets

### 2.2 对几何目标仿真

基于对点目标的仿真,采用相同的收发模式、发射信

号对几何目标进行仿真。将几何目标至于稀疏基阵的正下方区域,如图 10(a)所示,为了更好地对几何目标进行识别,将其置于基阵成像区域的拐角<sup>[25]</sup>,图 10(b)所示为几何目标的仿真结果,可以基本实现对于目标的成像识别和判断。结果表明,凸优化阵列综合得到的稀疏基阵可以用于水下环境超声正视成像。

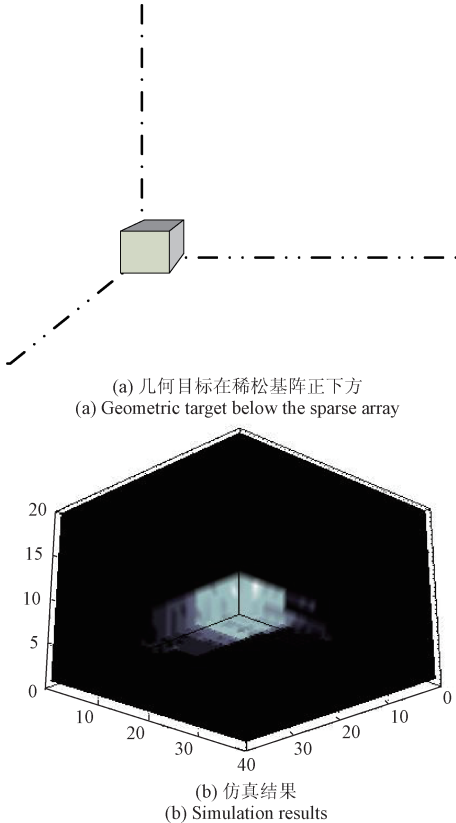


图 10 几何目标成像仿真结果

Fig. 10 Imaging simulation results of geometric target

### 3 结论

本文通过将稀疏基阵的波束图和使用切比雪夫综合形成的波束图进行比较,旁瓣峰值电平平均为  $-15$  dB,通过比较发现在相同旁瓣级的条件下,凸优化方法综合以后的稀疏基阵牺牲了主瓣的宽度,大大降低了阵元数量以及系统复杂度。由于主瓣宽度的展宽会影响到测量的精度,但对于大范围的水下探测场景来说影响不大,所以该方法阵列综合优化的稀疏基阵应用范围还是非常广泛的。采用  $\ell_1$  加权范数最小化的方法,设定目标函数及约束条件,进行多次迭代运算,综合优化出与期望波束指向的稀疏基阵,可以大幅减少阵元的数目,降低系统的成本与复杂度。同时,分别对点目标、几何目标进行仿真,结果显示性能良好,该凸优化方法综合得到的稀疏基阵在水下超声正视成像的可行性得到了保证。

### 参考文献

- [1] GAN W S. Acoustical imaging: Techniques and applications for engineers [C]. Acoustical Imaging: Techniques and Applications for Engineers, 2012:43-57.
- [2] 李鹏, 郑大成, 徐丽华, 等. 稀疏基阵水下声成像的压缩感知方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1843-1850.  
LI P, ZHENG T CH, XU L H, et al. Compressive sensing method for underwater acoustic imaging using sparse array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1843-1850.
- [3] 刘志浩, 陈振华, 陈果, 等. 基于线阵列超声相控阵三维成像的实现研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):400-406.  
LIU ZH H, CHEN ZH H, CHEN G, et al. Research on 3D imaging based on linear ultrasonic phased array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3):400-406.
- [4] TRUCCO A, PALMESE M, REPETTO S. Devising an affordable sonar system for underwater 3-D vision [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2008, 57(10):2348-2354.
- [5] ELLIOTT R S. Antenna Theory and Design [M]. Newyork:Wiley, 1998.
- [6] HE X H, ZHU K R, WU S J. Thinned array synthesis based on integer coded genetic algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology 2010, 32(9): 2277- 2281.
- [7] LIU J, ZHAO Z, YUAN M, et al. The filter diagonalization method in antenna array optimization for pattern synthesis[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(12):6123-6130.
- [8] LI W T, SHI X W, HEI Y Q. An improved particle swarm optimization algorithm for pattern synthesis of phased arrays [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 82(2): 319-332.
- [9] YANG K, ZHAO Z, LIU Q H. Fast pencil beam pattern synthesis of large unequally spaced antenna arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(2):627-634.
- [10] 郭宾, 张冰尘. 基于 CAMP 稀疏重建算法的并行实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):24-28.  
GUO B, ZHANG B CH. Parallel implementation of sparse reconstruction algorithm based on CAMP [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5): 24-28.
- [11] NONGPIU R C, SHPAK D J. Synthesis of linear and planar arrays with minimum element selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(20): 5398-5410.

- [12] 涂光鹏, 巩朋成, 蔡竞业, 等. 基于迭代加权 L1 范数的稀疏阵列综合[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(7):229-232.  
TU G P, GONG P CH, CAI J Y, et al. Sparse array synthesis based on the iterative weighted L1 norm[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(7): 229-232.
- [13] CEN L, SER W, CEN W, et al. Linear sparse array synthesis via convex optimization [C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2010:4233-4236.
- [14] PRISCO G, D'URSO M. Maximally sparse arrays via sequential convex optimization [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012(11):192-195.
- [15] 吴海洲, 王鹏毅, 郭肃丽. 全空域相控阵测控系统波束形成分析[J]. 无线电工程, 2011, 41(11):13-15.  
WU H ZH, WANG P Y, GUO S L. Analysis on beamforming of whole airspace phased array TT&C system[J]. Radio Engineering, 2011, 41(11):13-15.
- [16] NAI S E, SER W, YU Z L, et al. Beampattern synthesis for linear and planar arrays with antenna selection by convex optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2010, 58(12):3923-3930.
- [17] 阳凯. 阵列方向图综合与自适应波束形成技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.  
YANG K. Research on array pattern synthesis and adaptive beamforming technologies [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [18] FUCHS B. Synthesis of sparse arrays with focused or shaped beampattern via Sequential convex optimizations[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(7):3499-3503.
- [19] DU Y, HU F, LIU X, et al. Planar sparse array synthesis for sensor selection by convex optimization with constrained beampattern [J]. Wireless Personal Communications, 2016, 89(4):1147-1163.
- [20] 段鹏辉, 郑会利. 阵列天线的切比雪夫方向图综合[J]. 电子科技, 2009, 22(1):1-4.  
DUAN P H, ZHENG H L. Integration of the directivity pattern by chebyshev for the array antenna[J]. Electronic Science and Technology, 2009, 22(1):1-4.
- [21] 陈金立, 钟济阳, 曹华松. 基于凸优化的低复杂度平面阵列综合方法[J]. 现代电子技术, 2016(3):9-12.  
CHEN J L, ZHONG J Y, CAO H S. A low complexity synthesis method for planer array based on convex optimization[J]. Modern Electronics Technology, 2009, 22(1):1-4.
- [22] 孙超. 水下多传感器阵列信号处理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007.

SUN CH. Underwater Multi-Sensor Array Signal Processing [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.

- [23] 陆兴华, 彭意达. 基于回波探测的汽车防撞系统智能测距方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6):126-129.  
LU X H, PENG Y D. Intelligent ranging method of vehicle anti-collision system based on echo detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(6): 126-129.
- [24] 彭虎. 超声成像算法导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008.  
PENG H. An Introduction to Ultrasonic Imaging Algorithm[M]. University of Science and Technology of China Press, 2008.
- [25] 李鹏, 黄兆宇, 徐丽华, 等. 基于虚拟阵元设计的稀疏基阵的水下正视声学成像[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 2016, 40(6):51-58.  
LI P, HUANG ZH Y, XU L H, et al. Underwater imaging with the acoustic sensor sparse array optimized by the virtual method [J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2016, 40(6):51-58.

## 作者简介



**李文强**, 2015 年于洛阳理工学院获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为声学传感器阵列优化、波束形成算法及电路设计。  
E-mail:978463949@qq.com

**Li Wenqiang** received B. Sc. from Luoyang Institute of Science and Technology in 2015. Now, he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes acoustic sensor array synthesis, beamforming algorithm and circuit design.



**李鹏**(通讯作者), 1990 年于南京理工大学获得学士学位, 2003 年于中国矿业大学获得硕士学位, 2008 年于西安交通大学获得博士学位, 现为南京信息工程大学教授、高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向为超声检测与成像技术、信号与信息处理、气象要素检测方法和仪器装备。

E-mail:002036@nuist.edu.cn

**Li Peng** (Corresponding author) received B. Sc. from Nanjing University of Science and Technology in 1990, M. Sc. from China University of Mining and Technology in 2003, and Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2008, respectively. He is a professor, senior engineer and M. Sc. supervisor in Nanjing University of Information Science and Technology. His current research interests include ultrasonic detection and imaging, signal and information processing, and meteorological element measurement methods and instruments.