引用格式： 刘倩, 朱安珏. 基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成[J]. 声学技术, 2020, **39**(3): 379-384. [LIU Qian, ZHU Anjue. Second-order cone programming based robust low sidelobe adaptive beamforming[J]. Technical Acoustics, **39**(3): 379-384.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.03.021

基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成

刘 倩[1,2]，朱安珏[1]
(1. 中国科学院声学研究所东海研究站，上海 201815；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 针对水下成像时圆弧阵常规波束旁瓣级较高，当存在强干扰时容易带来较多虚警的缺点，提出一种基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成方法。该方法通过对波束旁瓣进行优化设计，可以将波束旁瓣级进行严格控制，并进一步结合协方差矩阵重构法，使波束形成器的稳健性得到提高，最后将该波束优化问题转化为二阶锥规划问题进行求解。计算机仿真结果表明，相较于其他算法来说，文中算法在波束旁瓣级得到严格控制的同时，可以在存在各类失配的情况下获得更高的输出信干噪比，稳健性更高。水池实验进一步验证了该方法的有效性，该研究成果可以在声呐成像领域应用。

关键词： 二阶锥规划；稳健；低旁瓣；自适应波束形成
中图分类号： TN911.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-3630(2020)-03-0379-06

Second-order cone programming based robust low sidelobe adaptive beamforming

LIU Qian[1,2], ZHU Anjue[1]
(1. *Shanghai Acoustic Laboratory*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201815, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, a robust low sidelobe adaptive beamforming method based on second-order cone programming is proposed in view of the disadvantages of high sidelobe level of arc array conventional beamforming and high false alarm rate in the case of strong interference. This method can strictly control the sidelobe levels by the optimization design of beam sidelobes, and further improves the robustness of the low sidelobe beamformer by the covariance matrix reconstruction method. Finally, the beamformer optimization problem is transformed into a second-order cone programming problem and then solved. The results of computer simulation show that, compared with other algorithms, the proposed algorithm can achieve higher signal to interference plus noise ratio (SINR) and higher robustness in the case of various mismatches while strictly controlling the beam sidelobe levels. The pool experiment further proves the validity of the proposed method, and this method can be used in the field of sonar imaging.

Key words: second-order cone programming; robust; low sidelobe; adaptive beamforming

0 引 言

在阵列信号处理中，旁瓣级大小一直是波束形成器设计中的一个重要指标。低旁瓣可以有效抑制来自旁瓣区域的干扰，降低目标检测的虚警概率。目前为止已经出现了大量有关波束旁瓣控制的算法。第一类为加窗法，例如 Dolph-Chebyshev 加权[1]可以在主瓣宽度一定的情况下获得最低的均匀旁瓣，但是该方法只适用于均匀线列阵，并且要求各阵元各向同性、不存在差异。第二类为基于自适应阵列理论的方法，例如 Olen 等在 1990 年提出的静态波束图数字综合方法[2]。该方法通过在旁瓣区域增加虚拟干扰源，运用自适应阵原理，采用迭代法调节干扰强度从而达到旁瓣控制的目的。该方法适用于任意阵型，并且不要求阵元满足各向同性，但在迭代过程中会引起波束主瓣的较快增宽并且迭代增益因子难以选择、迭代存在一定的收敛误差，导致波束旁瓣不能得到严格的控制。第三类为基于凸优化理论的波束图优化算法，例如 Liu 等[3]利用二阶锥规划(Second-Order Cone Programming, SOCP)方法设计的旁瓣控制自适应波束形成器，文献[4-5]提出了基于二阶锥规划的最低旁瓣波束形成器优化设计方法，该类方法适用于任意阵型并且对阵元

收稿日期： 2019-04-20; **修回日期：** 2019-05-28
作者简介： 刘倩(1993－), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。
通讯作者： 朱安珏, E-mail: ajzhu@21cn.com

无要求，可对波束旁瓣进行严格控制。

文献[1-3]中的旁瓣控制波束形成方法只将重点放在了旁瓣级控制方面，而对波束形成器的稳健性没有提出要求。文献[4-5]中，通过对加权向量的范数进行约束从而对波束形成器的稳健性进行提升，但在该方法中，加权向量范数的具体约束值通常是根据经验进行选取，不能通过计算得到严格的解。为了使该方法能运用于实际基阵，则需要更进一步提高旁瓣控制波束形成算法的稳健性。众所周知，自适应波束形成器的性能受到协方差矩阵与期望信号导向向量的影响，当期望信号存在于训练数据中，并且协方差矩阵估计不准时，自适应波束形成器的性能会出现很大程度的下降。针对以上情况，近年来已有多种改进算法对自适应波束形成器的稳健性进行讨论。其中一类是对期望信号导向向量进行估计，例如序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)算法[6]、最少先验信息导向向量估计法[7]等。第二类是对协方差矩阵进行改进，其中较为经典的是原始对角加载算法(Load Sample Matrix Inversion, LSMI)[8]及其一系列改进算法，例如加权向量约束法(Norm Constrained Capon Beamforming, NCCB)[9]、最差性能最佳化(Worst-Case Performance Optimization, WCPO)[10]等。但是对角加载类算法在输入信噪比较高的情况下其输出信干噪比会出现较大程度的降低，其原因是，此类算法无法去除期望信号存在于训练数据中所带来的影响，接收信号中始终包含期望信号成分，当信噪比逐渐增高时，各类误差所导致的信号“自消”现象始终存在，导致自适应波束形成器产生较大的性能下降，而对角加载类方法无法改进这种性能下降。

本文针对自适应波束形成器的旁瓣控制和稳健性提高方面，提出了一种基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成器设计方法，本方法对波束形成器的旁瓣级进行控制，并且利用干扰和噪声协方差矩阵重构法对波束形成器的稳健性进行提高，从而达到低旁瓣和高稳健性这两个目的。

1 基于 SOCP 的圆弧阵波束图设计

1.1 二阶锥规划简介

二阶锥规划是凸优化问题的一个子集，常常被用来解决波束优化设计问题。SeDuMi 工具箱可专门用于解决二阶锥规划问题，其具有计算量小和计算结果精确的特点，并且可对优化问题的可解与否直接进行判别[11]。在 SeDuMi 中，标准的对称锥优化问题形式定义为

$$\max \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y},\ \text{subject to}\ \boldsymbol{c}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{K} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{y}$ 包含优化变量，$\boldsymbol{A}$ 是任意矩阵，$\boldsymbol{b}$ 与 $\boldsymbol{c}$ 是任意向量，$\boldsymbol{K}$ 是一个对称锥集合，零锥与二阶锥都是对称锥的子集。

$\boldsymbol{q}$ 维二阶锥的定义为

$$Q^{q}\triangleq\left\{\begin{bmatrix}t\\ x\end{bmatrix}\middle| t\in\boldsymbol{R},\ \boldsymbol{x}\in\boldsymbol{C}^{q-1},\ t\geqslant\boldsymbol{x}\right\} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为所求优化变量，$\boldsymbol{C}$ 为复数向量集，t 为二阶锥的限定范围。

零锥定义为

$$\{0\}^{f}\triangleq\left\{\boldsymbol{x}\middle|\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{C}^{f\times 1},\boldsymbol{x}=0\right\} \tag{3}$$

式(3)可以代表等式约束。

波束优化设计问题即是将加权向量 $\boldsymbol{w}$ 的求解转化为在一系列线性等式与二阶锥约束条件下使得目标函数最大化的问题。即将约束问题写成如下形式：

$$\max \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y},\ \text{subject to}\ \boldsymbol{c}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\in\{0\}^{f}\times Q_{1}^{q_1}\times\cdots\times Q_{N}^{q_N} \tag{4}$$

然后再利用已有的内点方法对上述问题进行求解。

1.2 干扰加噪声协方差矩阵重构

前面已经提到，对角加载类算法虽然可以对自适应波束形成的性能进行改进，但其输出信干噪比在输入信噪比较高时还是会出现较大程度的降低。因此，为了提高波束形成器的稳健性，一种有效的方法就是将协方差矩阵中的期望信号成分滤除。基于此思想，Gu 等提出了干扰协方差矩阵重构算法[12]。该算法利用 Capon 空间谱估计，对期望信号存在区域以外的其他区域进行积分，从而获得重构的干扰加噪声协方差矩阵，减小了期望信号存在于接收信号中所带来的干扰。具体步骤如下：

假设观测区间由 Θ_{s} 与 $\Theta_{\mathrm{i+n}}$ 两部分组成，其中 Θ_{s} 为期望信号所存在的区域，$\Theta_{\mathrm{i+n}}$ 为干扰信号存在的区域，Θ_{s} 与 $\Theta_{\mathrm{i+n}}$ 互补。利用 Capon 空间谱估计作为空间谱分布，再对 $\Theta_{\mathrm{i+n}}$ 区间进行积分则可得到重构的干扰加噪声协方差矩阵，即：

$$\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{i+n}}=\int_{\Theta_{\mathrm{i+n}}}\hat{\boldsymbol{P}}(\theta)\boldsymbol{d}(\theta)\boldsymbol{d}^{\mathrm{H}}(\theta) \tag{5}$$

其中：$\hat{\boldsymbol{P}}(\theta)=\dfrac{1}{\boldsymbol{d}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{d}(\theta)}$ 为 Capon 空间谱估计；$\boldsymbol{d}(\theta)$ 为干扰信号存在区域对应的导向向量。利用干扰加噪声协方差矩阵重构法对样本协方差矩阵进行改进后，可提高波束形成器的稳健性。

2　基于 SOCP 的稳健低旁瓣自适应波束形成

假设阵元数为 N，波束的主轴方向为 θ_s，旁瓣区域为 Θ_{SL}，$\theta_j \in \Theta_{\mathrm{SL}}$，则稳健低旁瓣自适应波束形成可以表述成下述问题：

$$\begin{cases}\min_{\boldsymbol{w}} \ \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{i+n}}\boldsymbol{w} \\ \text{subject to } \boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_s)\boldsymbol{w}=1 \\ \left|\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_j)\boldsymbol{w}\right| \le \zeta, \ j=1,\cdots,J\end{cases} \tag{6}$$

其中：$\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{i+n}}$ 用干扰加噪声协方差矩阵重构法进行改进后的样本协方差矩阵，$\boldsymbol{a}(\theta_s)$ 为期望信号导向向量，$\boldsymbol{a}(\theta_j)$ 为波束旁瓣区域所对应的导向向量。此问题是一个凸优化问题，为求解此问题，需要将其转换为标准的对称锥优化问题，具体求解步骤如下：

首先，利用楚列斯基(Cholesky)分解将上述问题中的二次目标函数转换为线性目标函数，即：

$$\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\hat{\boldsymbol{R}}_{\mathrm{i+n}}\boldsymbol{w}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{w}^2 \tag{7}$$

引入一个非负标量 τ，使得 $\boldsymbol{L}\boldsymbol{w} \le \tau$，则上述问题可以转化为

$$\begin{cases}\min_{\boldsymbol{w}} \ \tau \\ \text{subject to } \boldsymbol{L}\boldsymbol{w} \le \tau \\ \boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_s)\boldsymbol{w}=1 \\ \left|\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_j)\boldsymbol{w}\right| \le \zeta, \ j=1,\cdots,J\end{cases} \tag{8}$$

其次，将上述问题转化为二阶锥约束问题。令 $\boldsymbol{b} \triangleq [-1 \ 0 \ \cdots \ 0]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{y}=\left[\tau \ \ \zeta \ \ \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$，使得 $-\tau=\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$。则上式中的等式约束可写为

$$\begin{aligned}&1-\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_s)\boldsymbol{w}=1-\left(0 \ 0 \ \boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_s)\right)\boldsymbol{y} \triangleq \\ &\quad c_1-\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \in \{0\}^1\end{aligned} \tag{9}$$

当 Kf=1，二阶锥约束可写为

$$\begin{aligned}&\begin{pmatrix}\tau \\ \boldsymbol{L}\boldsymbol{w}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 \\ 0_{\boldsymbol{N}\times 1}\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}-1 & 0 & \boldsymbol{0}_{1\times N}^{\mathrm{T}} \\ 0_{\boldsymbol{N}\times 1} & 0_{\boldsymbol{N}\times 1} & -\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{N}\times\boldsymbol{N}}\end{pmatrix}\boldsymbol{y} \triangleq \\ &\quad c_2-\boldsymbol{A}_2^{T}\boldsymbol{y} \in Q^{N+1}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}\zeta \\ \boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_j)\boldsymbol{w}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 \\ 0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0 & -1 & \boldsymbol{0}_{1\times N}^{\mathrm{T}} \\ 0 & 0 & -\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_j)_{1\times N}\end{bmatrix}\boldsymbol{y} \triangleq \\ &\quad c_{j+2}-\boldsymbol{A}_{j+2}^{T}\boldsymbol{y} \in Q^2, \ j=1,\cdots,J\end{aligned} \tag{11}$$

则 $K\cdot q=[N+1 \ \ 2 \ \cdots \ 2]$。令 $\boldsymbol{c} \triangleq [c_1 \ \ c_2 \ \cdots \ c_{J+2}]$，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \triangleq \left[\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}} \ \ \boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \boldsymbol{A}_{J+2}^{\mathrm{T}}\right]$。

最后，将 $\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{c}$、$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{K}$ 代入 SeDuMi 中即可求解出 $\boldsymbol{y}$ 和复加权向量 $\boldsymbol{w}=[y_3 \ y_4 \ \cdots \ y_N]$。

3　仿真分析

3.1　旁瓣控制性能分析

假设一半径为 0.262 5 m、张角为 165°的圆弧上均匀分布着 384 个阵元，定义圆心为极坐标原点，最中心两个阵元中垂线所在方向为 0°方向。假设信号频率为 390 kHz，选取相对 0°方向对称的 186 个阵元在 0°方向形成波束。在理想情况下，给出圆弧阵常规波束图和基于二阶锥规划的低旁瓣自适应波束图，如图 1 所示，放大后的波束图如图 2 所示。

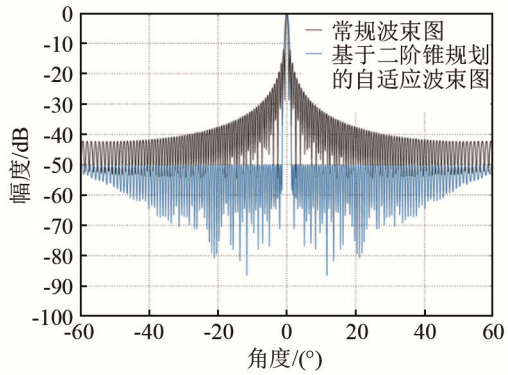


图 1　理想情况下圆弧阵波束图

Fig.1　Arc array beam pattern under ideal condition

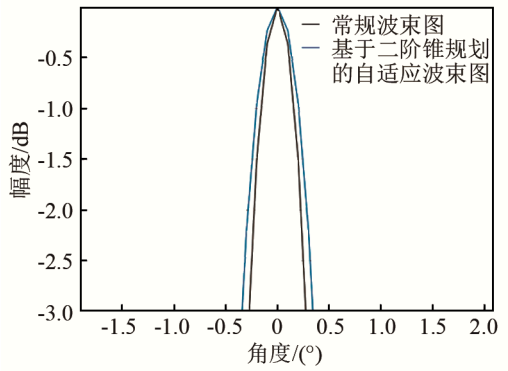


图 2　放大后的波束图

Fig.2　Enlarged beam pattern

由图 1 可以看出，圆弧阵的常规波束图旁瓣较高，最高旁瓣级大约为−11.95 dB，而基于二阶锥规划的低旁瓣自适应波束图可以将 $[-60°,-1.5°]\cup[1.5°,60°]$ 区域的旁瓣级控制到−50 dB。由图 2 可以看出，常规波束形成波束图−3 dB 束宽约为 0.55°，而基于二阶锥规划的低旁瓣自适应波束图−3 dB 束宽增大到约 0.86°。

3.2　稳健性分析

波束形成器的稳健性是指其在理想情况下获得的性能指标(如输出信干噪比)在存在各类失配情

况下的下降程度。加权向量范数的大小是表征波束形成器稳健性高低的一个指标，波束加权向量范数越小，波束形成器对误差的灵敏度越低，稳健性越高。

本文将针对以下两种常见的失配情况，分别利用对角加载(LSMI)、最差性能最佳化(WCPO)以及协方差矩阵重构法(R-Reconstruction)对样本协方差矩阵进行改进，计算不同输入信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)情况下波束形成器的输出信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)以及加权向量范数的值，并与未进行改进的样本协方差矩阵求逆法(Sample Matrix Inversion, SMI)的输出信干噪比进行比较。

3.2.1 阵元位置与响应存在误差

在实际中，由于人工安装会导致阵元位置产生一定的误差，并且阵元会存在一定的方向性，导致方向幅度响应不同，从而给波束形成器的性能带来一定的影响。考虑阵元位置存在误差与阵元幅度响应具有一定的方向性的情况，假设上述圆弧阵各阵元真实位置所处角度与理想位置所处角度的误差服从$[-0.05\theta, 0.05\theta]$的均匀分布，$\theta$为阵元间隔角度，且各阵元具有方向性，–3 dB 响应时的角度为 90°。图 3、4 所示为阵元位置与幅度响应存在误差时的波束输出信干噪比及加权向量范数。

由图 3、4 可以看出，在存在阵元位置误差与响应误差的情况下，采用干扰协方差矩阵重构法(R-Reconstruction)对样本协方差矩阵进行改进后，相对于 SMI、LSMI 与 WCPO 方法，在输入信噪比逐渐增大的情况下，输出信干燥比略高于 WCPO，远高于 SMI 与 LSMI，并且具有最小的加权向量范数值，稳健性最高。

3.2.2 期望信号在传播过程中产生波前畸变

当期望信号在非各向同性介质中传播时，非常

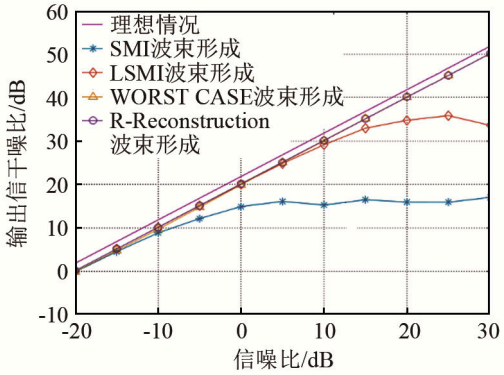


图 3 阵元位置与幅度响应存在误差时的输出信干噪比
Fig.3 Output SINR when error appears in sensor position and amplitude response

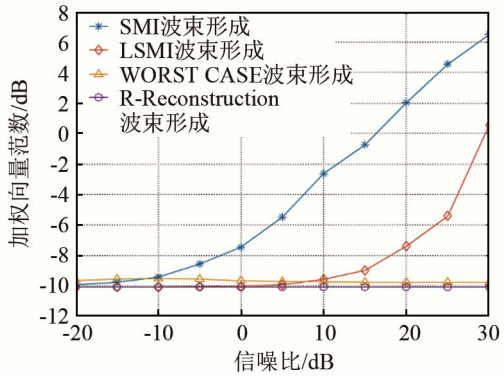


图 4 阵元位置与幅度响应存在误差时的加权向量范数
Fig.4 Norm of weight vector when error appears in sensor position and amplitude response

容易产生一定的幅度和相位的畸变，会导致期望信号导向向量产生一定的误差，从而波束形成器的性能下降。假设期望信号导向向量在传播过程中产生了相位畸变，相位误差服从均值为 0、方差为 0.04 的高斯分布。图 5、6 所示为期望信号存在波前畸变时的波束输出信干噪比及加权向量范数。

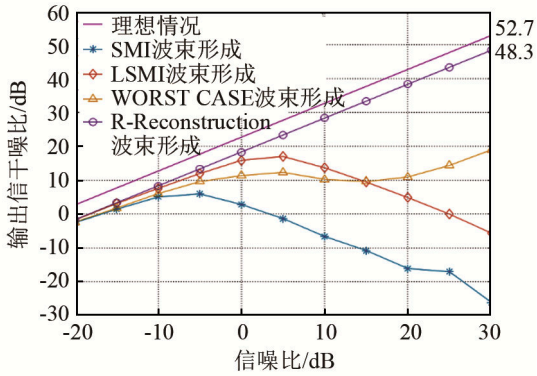


图 5 期望信号存在波前畸变时的输出信干噪比
Fig.5 Output SINR in the case of wavefront distortion

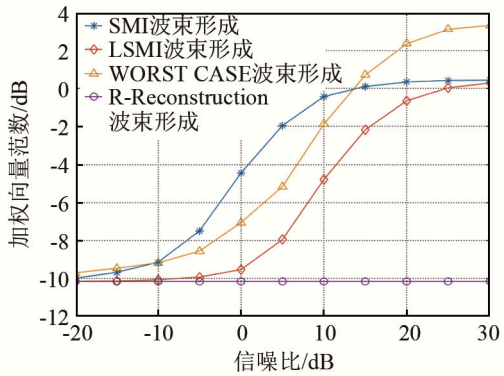


图 6 期望信号存在波前畸变时的加权向量范数
Fig.6 Norm of weight vector in the case of wavefront distortion

由图 5、6 可以看出，在期望信号存在波前畸变的情况下，在输入 SNR 大于–10 dB 之后，SMI、LSMI 与 WCPO 算法的输出 SINR 均产生了很大程度的下降，而采用干扰协方差矩阵重构法

(R-Reconstruction)对样本协方差矩阵进行改进后，相对于理想情况下的输出 SINR 只下降了约 4 dB，性能下降远小于其他 3 种算法，并且其具有最小的加权向量范数值，稳健性最高。

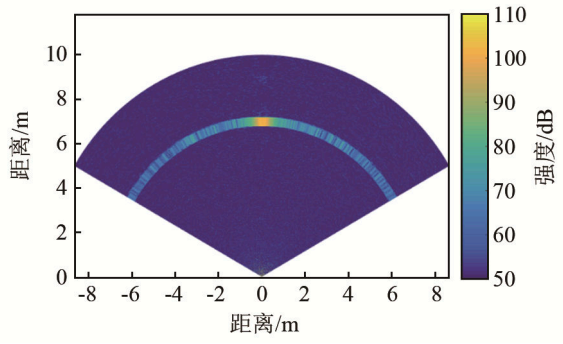
综合上述两种失配情况下波束形成器的输出信干噪比和加权向量范数的结果可以看出，利用 LSMI、WCPO 和 R-Reconstruction 算法对样本协方差矩阵进行改进后，波束形成器的输出 SINR 相较于未进行改进的 SMI 算法均产生了较大程度的提高，但利用 R-Reconstruction 对样本协方差矩阵进行改进后，相较于利用 LSMI 与 WCPO 算法，输出 SINR 更高。并且当输入 SNR 增大时，输出 SINR 与理想情况下的输出 SINR 相差都为一定值，而其他方法在输入 SNR 逐渐增大的情况下，输出 SINR 下降程度越来越大，稳健性更低。

4　实验结果及分析

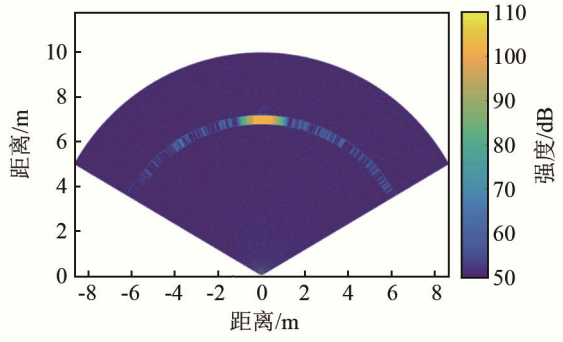
为了验证基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成方法对成像效果的改进，进行了水池实验。首先将成像声呐放置在水池一侧的中间位置，在成像声呐中心线正前方 6.78 m 处放置一个点声源，与成像声呐同深度。成像声呐的基阵是具有 384 个阵元、半径为 0.262 5 m、张角为 165°的圆弧阵列，信号频率为 390 kHz。实验中每 186 个阵元形成一个波束，共形成了 384 个波束。采用常规波束形成和基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成的结果如图 7 所示。图 7(a)为常规波束形成成像结果，7(b)为稳健低旁瓣自适应波束形成成像结果。图 8 为某距离处的输出强度。

从图 7 中可以看出，在无强干扰的情况下，利用上述两种方法均可以分辨出目标的位置。但是常规波束形成成像中目标的旁瓣级较高，在目标检测时易产生虚警。而本文提出的基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成的成像，由于波束旁瓣级大大降低，因此目标变得更清晰，但是波束主瓣增宽，会在一定程度上降低成像声呐的分辨率。

从图 8 中可以看出，在对目标成像强度不变的情况下，本文所提算法可以将旁瓣区域的强度降低约 10 dB 左右，但并未达到仿真所得到的效果，产生此种情况的原因可能为：(1) 在仿真时对自适应波束形成失配情况考虑不全面；(2) 在协方差矩阵重构时，对于期望信号所存在的区域估计不准，导致在后续的优化计算中，旁瓣区域的设定存在问题，导致优化计算出的解存在误差。



(a) 常规波束形成



(b) 稳健低旁瓣波束形成

图 7　不同波束形成算法的成像效果

Fig.7　The imaging effects of different beamforming methods

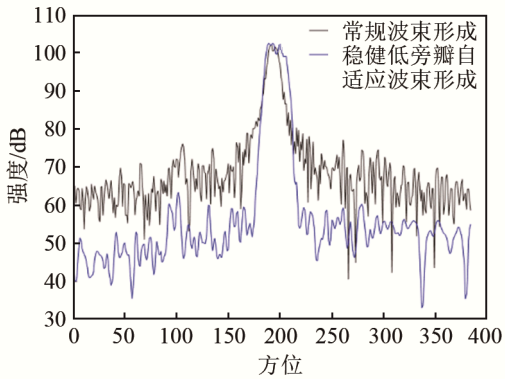


图 8　某距离处的输出强度

Fig.8　Output intensities at a distance

5　结　论

本文提出了一种基于二阶锥规划的稳健低旁瓣自适应波束形成算法，该算法利用二阶锥规划算法设计低旁瓣自适应波束形成，并且针对自适应波束形成容易受到各类失配因素的影响从而导致性能大幅下降的问题，利用干扰加噪声协方差矩阵重构法对该算法的稳健性进行提高。仿真结果表明，该算法在很大的输入信噪比范围内可以获得接近于理想情况下的输出信干噪比，并且加权向量范数最小，稳健性最高。水池实验结果证明，本文所提算法在成像时，可以在一定程度上降低旁瓣级，

但是并未达到理论计算值，故本文所提算法还有待改进。

参 考 文 献

[1] DOLPH C L. A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beam width and side-lobe level[J]. Proc Ire, 1946, **35**(6): 335-348.

[2] OLEN C A, COMPTON R T J. A numerical pattern synthesis algorithm for arrays[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1990, **38**(10): 1666-1676.

[3] LIU J, GERSHMAN A B, LUO Z Q, et al. Adaptive beamforming with sidelobe control: a second-order cone programming approach[J]. Signal Processing Letters IEEE, 2015, **10**(11): 331-334.

[4] 鄢社锋, 马远良, 孙超. 任意几何形状和阵元指向性的传感器阵列优化波束形成方法[J]. 声学学报, 2005, **30**(3): 264-270.
YAN Shefeng, MA Yuanliang, SUN Chao. Beampattern optimization for sensor arrays of arbitrary geometry and element directivity[J]. Acta Acustica, 2005, **30**(3): 264-270.

[5] YAN S F, MA Y L. Robust supergain beamforming for circular array via second-order cone programming[J]. Applied Acoustics, 2005, **66**(9): 1018-1032.

[6] HASSANIEN A, VOROBYOV S A, WONG K M. Robust adaptive beamforming using sequential quadratic programming: an iterative solution to the mismatch problem[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2008, **15**(1): 733-736.

[7] KHABBAZIBASMENJ A, VOROBYOV S A, HASSANIEN A. Robust adaptive beamforming based on steering vector estimation with as little as possible prior information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, **60**(6): 2974-2987.

[8] COX H, ZESKIND R M, OWEN M M. Robust adaptive beamforming[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1987, **35**(10): 1365-1376.

[9] STOICA P, WANG Z, LI J. Robust capon beamforming[J]. Signal Processing Letters IEEE, 2003, **10**(6): 172-175.

[10] VOROBYOV S A, GERSHMAN A B, LUO Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, **51**(2): 313-324.

[11] STURM J F. Using SeDuMi 1.02, A matlab toolbox for optimization over symmetric cones[J]. Optimization Methods & Software, 1999, **11**(1-4): 625-653.

[12] GU Y, LESHEM A. Robust adaptive beamforming based on interference covariance matrix reconstruction and steering vector estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, **60**(7): 3881-3885.

• 简 讯 •

《声学技术》2019 年度编委会工作会议纪要

2020 年由于疫情影响，不便聚集开会，《声学技术》编辑部于 2020 年 4 月 20 日发起了线上书面编委会会议，邀请了包括外地编委在内的全体编委参会。会上，编辑部李秀红书面汇报了期刊 2019 年的工作进展情况，就出版情况和稿件状况、期刊在全国学术期刊（按学科）所处地位、编委会换届、优秀论文和优秀编委评选、期刊审读、制度建设以及下一步的工作设想做了详细汇报。线上会议历经 20 余天，编委们提出了很多中肯的、富有建设性的具体意见。

新任主编胡长青研究员首先发言。他对各位编委亲自投稿、审稿，并且带动年轻科技工作者踊跃投稿的示范和宣传作用，给予了《声学技术》持续前进的源泉和动力表示感谢。胡长青主编还就约稿、优秀论文评选提出了建议。

编委们就如何进一步办好期刊纷纷献计献策，提出了许多具体的建议，如：向在科研方面比较活跃且成绩较好的专家约稿、组稿，组织专题文章；采用线上审稿系统、设置时间节点、缩短审稿周期；优秀论文评选办法的改进；改进学风，杜绝为项目交差随意加注基金项目编号；对稿件的内容质量提高要求等。

《声学技术》编辑部将根据主办单位领导、主编的办刊思想，对编委们提出的建议认真研究，积极落实。

《声学技术》编辑部