

强相干干扰下基于二阶锥规划的圆弧阵宽带二维成像

黄 聪 孙大军* 张殿伦 滕婷婷
(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)
(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要: 该文针对水下目标 2 维成像在强相干干扰情况下, 目标亮点容易被淹没的问题, 以及圆弧阵波束的高旁瓣给图像检测带来较多虚警的缺陷, 提出基于二阶锥规划的宽带 2 维成像优化方法。该方法在对相干干扰抑制的同时, 很好地控制了波束的旁瓣。分析了 2 维成像算法流程中由于时域滑窗导致阵列的接收信号矢量与阵列流形不同, 造成二阶锥规划设计的权值与阵列的接收信号矢量失配, 旁瓣控制和零陷设计无法满足设计的要求。针对该问题提出利用计算出的滑窗理论阵列的接收信号矢量代替阵列流形来进行二阶锥权值设计的方法, 通过改进的二阶锥权值, 将波束优化与圆弧阵的 2 维成像优化相结合。计算机仿真和水池实验都验证了该方法的有效性。

关键词: 声呐; 2 维成像; 二阶锥规划; 旁瓣控制; 干扰抑制

中图分类号: U666.72; TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2633-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01796

Wideband Two-dimensional Imaging with Arc Array Based on Second-order Cone Programming under Strong Coherent Interference

Huang Cong Sun Da-jun Zhang Dian-lun Teng Ting-ting

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To solve the problem that in two-dimensional imaging the target under water is easily hidden by the strong coherent interference, and high side lobe of arc array beam pattern causes more false alarm, an optimized two-dimensional imaging method based on second-order cone programming is proposed. Not only the strong coherent interference is suppressed, but also the side lobe is controlled well with the method. The issue that the sliding window in time domain leads to the difference between the steering vector and array manifold is analyzed, which causes the mismatch between the weights computed by the second-order cone programming and steering vector, and the failure to satisfy the side lobe control and null design requirement. To solve the issue, the method using the theoretical steering vector calculated by the sliding window in time domain instead of the array manifold to design the second-order cone programming weights is proposed, and the optimizations of the beam pattern and the arc array two-dimensional imaging are combined by the improved second-order cone programming weights. The validity of the proposed method is demonstrated by computer simulation and the pool experiment.

Key words: Sonar; Two-dimensional imaging; Second-order cone programming; Side lobe control; Interference suppression

1 引言

水下目标定位^[1,2]是水下探测、海岸防御、轨迹导航、目标打击的重要技术之一, 目标定位的精准性很大程度上决定了算法和设备的性能。2 维成像技术属于成像声呐^[3,4]的一种, 是利用 1 维阵列实现对目标距离和方位的 2 维分辨。通过实时有效的声

学图像可以直接对目标进行探测识别。存在强相干干扰时, 声学图像上目标亮度将被强干扰源的旁瓣所淹没, 且圆弧阵成像高旁瓣的特性给图像检测造成更多的虚警。

很多旁瓣抑制算法对阵列模型有要求, 无法直接利用在圆弧阵上, 而近场模型的旁瓣控制就更加困难。虚拟线阵技术^[5]利用均匀圆阵的相位模式激励理论, 转化为虚拟的均匀线阵, 再利用较成熟的线阵旁瓣控制算法, 但该方法不适用于圆弧阵及其他阵形中。文献[6-9]提出了增加虚拟干扰源来计算权值的方法, 该方法使用自适应迭代方式, 适用于非

2013-11-14 收到, 2014-07-03 改回

国家重点实验室基金(9140C200406110C2001), 国家部委基金和国家 863 计划项目(2012AA090901-4)资助课题

*通信作者: 孙大军 sundajun@hrbeu.edu.cn

均匀阵形, 但迭代的收敛性和波束输出的稳健性都不能得到保证。文献[10]利用最小均方准则自适应设计法使设计的波束按最小方差准则逼近期望响应, 但由于迭代的步长选取困难, 导致设计结果出现误差。

本文借助二阶锥规划^[11-14]设计出兼顾旁瓣控制, 干扰抑制, 波束稳健的圆弧阵权值, 在抑制相干干扰的同时很好地控制了波束的旁瓣, 并将其应用在2维成像的图像优化中。同时对二阶锥权值设计进行改进, 解决了2维成像算法流程中由于时域滑窗导致阵列的接收信号矢量与阵列流形失配, 造成旁瓣控制和零陷设计无法满足设计要求的问题。通过仿真和水池实验验证了该方法对2维成像的优化效果。

2 基于二阶锥规划的圆弧阵波束优化

契比雪夫加权是一种经典的波束旁瓣控制方法, 但其限制条件是只能用于远场条件下的均匀线阵。基于二阶锥规划的波束设计思想与契比雪夫加权方法的极大极小准则相同。由于该约束方法对阵列模型没有要求, 故可适用于任意阵型中, 可看作是契比雪夫加权在任意阵形上的拓展。

2.1 波束的旁瓣设计

假设阵元数为 N , 波束的主轴方向为 θ_0 , 则常规波束图的权值为阵列的导向矢量为

$$\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta_0) = e^{-j2\pi f t(\theta_0)} \quad (1)$$

不同来波方向的导向矢量组成的阵列流形矩阵 $\mathbf{a}(\Theta)$ 为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\Theta) &= [\mathbf{a}(\theta_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2) \quad \cdots \quad \mathbf{a}(\theta_M)] \\ &= [e^{-j2\pi f t(\theta_1)} \quad e^{-j2\pi f t(\theta_2)} \quad \cdots \quad e^{-j2\pi f t(\theta_M)}] \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $t(\theta_M)$ 表示目标在 θ_M 方向时相对于 N 个阵元的时延。

$$\mathbf{t}(\theta_M) = [\tau_1(\theta_M) \quad \tau_2(\theta_M) \quad \cdots \quad \tau_N(\theta_M)]^T \quad (3)$$

则波束图输出 \mathbf{B} 为

$$\mathbf{B} = \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{a}(\Theta) \quad (4)$$

若对波束进行优化设计, 在波束主瓣不失真的情况下, 对波束的旁瓣级和零陷深度进行规划, 其约束优化问题可以写为

$$\left. \begin{aligned} \min e \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0) = 1 \\ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i) \right| \leq \xi_1, \theta_i \in \Theta_{\text{SL}} \\ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_j) \right| \leq \xi_2, \theta_j \in \Theta_{\text{IL}} \\ \|\mathbf{w}\|^2 \leq e \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为波束的导向矢量, 对应波束的期望方向, Θ_{SL} 和 Θ_{IL} 分别表示旁瓣和零陷对应的角度范围, $\mathbf{a}(\theta_i)$ 和 $\mathbf{a}(\theta_j)$ 分别表示旁瓣角度和零陷角度的导向矢量, ξ_1 和 ξ_2 分别表示旁瓣级和零陷深度的控制, e 为波束形成权值范数的控制。式(5)的约束问题可以转化为二阶锥规划来求解权值 \mathbf{w} 。

接收阵基元的位置扰动误差和通道幅相误差^[15,16]都会导致阵列的阵列流形失配, 这就需要波束形成具有较好的稳健性。而阵列对白噪声的增益也是表征波束形成稳健性的重要参数之一。保证波束在期望方向上无失真响应, 则需要满足式(5)中的 $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0) = 1$, 由于导向矢量 $\|\mathbf{a}(\theta_0)\|^2 = N$, 可得

$$1 = \left| \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) \right|^2 \leq \|\mathbf{w}\|^2 \|\mathbf{a}(\theta)\|^2 \quad (6)$$

$$\|\mathbf{w}\|^2 \geq 1/N \quad (7)$$

若输入信号为高斯白噪声, 则白噪声的阵列输出增益 G_n 可以表示为

$$G_n = \mathbf{w}^H \mathbf{I} \mathbf{w} = \|\mathbf{w}\|^2 \quad (8)$$

可知阵列对白噪声的敏感度函数^[17]为 $\|\mathbf{w}\|^2$, 即加权向量的范数越小, 阵列对白噪声的输出增益越小。

利用二阶锥规划对式(5)的优化问题进行求解, 得到权值 \mathbf{w}_s 。可以看出 \mathbf{w}_s 是针对阵列流形矩阵 $\mathbf{a}(\Theta)$ 来设计的。保存每个预成波束角度所设计的二阶锥权值得

$$\mathbf{w}_{\text{sp}} = [\mathbf{w}_s(\theta_1) \quad \mathbf{w}_s(\theta_2) \quad \cdots \quad \mathbf{w}_s(\theta_M)] \quad (9)$$

在理想情况下, 给出圆弧阵常规波束形成和二阶锥规划的波束图, 如图1所示。圆弧阵为48元均匀半圆阵。约束条件为旁瓣角度 $\Theta_{\text{SL}} = [40^\circ \ 88^\circ] \cup [92^\circ \ 110^\circ] \cup [115^\circ \ 140^\circ]$, 旁瓣级的控制 ξ_1 为-20 dB; 零陷角度 $\Theta_{\text{IL}} = [110^\circ \ 115^\circ]$, 零陷深度的控制 ξ_2 为-70 dB。

由图1可以看出, 圆弧阵的常规波束形成旁瓣较高, 主旁瓣比约为-7 dB, -3 dB的主瓣宽度为 1.5° 。二阶锥规划的波束图旁瓣级控制在-20 dB, 110° 至 115° 的零陷深度控制在-70 dB, 满足了设计的要求, -3 dB的主瓣宽度增大为 2° 。

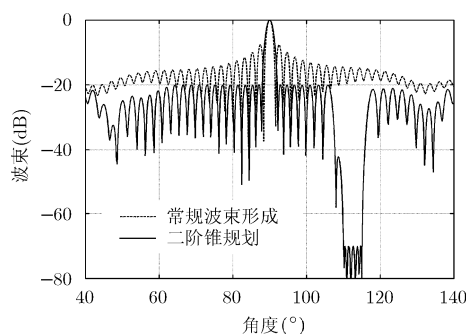


图1 理想情况下圆弧阵波束图

2.2 方位谱和波束图的联系

波束图是对阵列加以不同的权值，体现了阵列对不同方向信号的敏感程度，峰值对应波束的期望方向；而方位谱是在信号的来波方向固定时，对应各个期望方向波束形成器的输出功率，体现的是信号源对不同方向上波束的输出功率，也可看作是波束扫描的结果，其峰值对应目标的方位。假设信号来波方向为 θ_0 ，阵列的接收信号矢量为 $\mathbf{s}(\theta_0)$ ，将不同来波方向的阵列流形矩阵 $\mathbf{a}(\theta)$ 作为不同方位的权值，进行波束扫描得到常规的方位谱^[18]。若将式 (9) 的二阶锥权值 \mathbf{w}_{sp} 代替 $\mathbf{a}(\theta)$ ，则可得二阶锥加权的方位谱 p 为

$$p = \left| \mathbf{s}^H(\theta_0) \cdot \mathbf{w}_{sp} \right|^2 = \left[\left| \mathbf{s}^H(\theta_0) \cdot \mathbf{w}_s(\theta_1) \right|^2 \left| \mathbf{s}^H(\theta_0) \cdot \mathbf{w}_s(\theta_2) \right|^2 \dots \left| \mathbf{s}^H(\theta_0) \cdot \mathbf{w}_s(\theta_M) \right|^2 \right] \quad (10)$$

可知二阶锥权值 \mathbf{w}_{sp} 是通过约束阵列流形矩阵 $\mathbf{a}(\theta)$ 而得到的， \mathbf{w}_{sp} 中的每个列向量 $\mathbf{w}_s(\theta_i)$ 表示的是波束期望方向为 θ_i 的设计权值。而方位谱是利用 \mathbf{w}_{sp} 对阵列的接收信号矢量 $\mathbf{s}(\theta_0)$ 进行波束扫描而得到，体现了各个期望方向为 θ_i 时的波束对 θ_0 方向上信号的输出功率。若要求方位谱能够体现波束优化的设计，则需要阵列的接收信号矢量与此来波方向的导向矢量相同，即 $\mathbf{s}(\theta_0) = \mathbf{a}(\theta_0)$ ，这在截取完整接收信号的情况下可以满足。但在 2 维成像中，由于保证距离分辨率须在时域上对信号进行滑窗，导致根据约束 $\mathbf{a}(\theta)$ 得到的二阶锥权值 \mathbf{w}_{sp} 与 $\mathbf{s}(\theta_0)$ 失配，使方位谱的旁瓣控制和零陷设计出现偏差。具体分析在 3.2 节中说明。

3 圆弧阵宽带 2 维成像优化

3.1 圆弧阵宽带 2 维成像算法流程

宽带 2 维成像先根据扫描位置对脉冲压缩后的信号在时域上进行滑窗处理，再对滑窗内截取的信

号进行频域波束形成，得到距离和方位的 2 维图像处理结果，其流程图如图 2 所示。具体步骤如下：

首先，基元接收信号 $\tilde{s}(t - \tau_i)$ 与本地信号 $s(t)$ 进行脉冲压缩处理得到 $R_i(t)$ ，脉冲压缩在保留了阵列时延信息的同时提高了 2 维成像的距离分辨率。

$$R_i(t) = \tilde{s}(t - \tau_i) \otimes s(t), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

其次，根据扫描位置 (r, θ) 对应的各阵元时延和脉冲压缩后信号的脉宽来设计滑窗的中心点 z_1, z_2, \dots, z_N 和窗的长度 L ， z_1, z_2, \dots, z_N 为扫描位置对应的各阵元时延的采样点数。得到滑窗截取的信号 $H_i(t)$ 为

$$H_i(t) = R_i(z_i - L/2 : z_i + L/2) \quad (12)$$

然后，并对 $H_i(t)$ 进行 DFT，得到带宽内每个频点的频域信息 $\mathbf{X}_i(f_j)$ 。对每个频点进行相位修正，补偿回基元接收信号的频域信息为 $\mathbf{S}_i(f_j)$ ：

$$\mathbf{S}_i(f_j) = \mathbf{X}_i(f_j) \cdot \exp(-j2\pi f_j z_i / f_s), \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

最后，进行宽带频域波束形成，得到距离和方位的 2 维成像结果。

$$p(r, \theta) = \sum_{j=1}^M \left| \sum_{i=1}^N \mathbf{S}_i(f_j) \mathbf{w}_i^H(f_j) \right|^2 \quad (14)$$

3.2 滑窗对二阶锥加权方位谱的影响

假定目标位置相对于圆弧阵圆心的距离和方位为 (r_0, θ_0) ，先分析 2 维成像在距离 r_0 处的角度剖面，即 r_0 处的方位谱图。按照 3.1 节宽带 2 维成像的滑窗方式，在不同的扫描位置，滑窗截取的阵列接收信号矢量是不同的。在扫描位置 (r, θ) 偏离目标的真实位置 (r_0, θ_0) 时，滑窗无法截取到正确的脉冲压缩相关峰，导致阵列的接收信号矢量与导向矢量不同。这时若采用根据阵列流形矩阵 $\mathbf{a}(\theta)$ 得到的二阶锥权值 \mathbf{w}_{sp} 进行加权，则会造成阵列流形失配，输出方位谱的旁瓣控制和零陷设计无法满足要求。

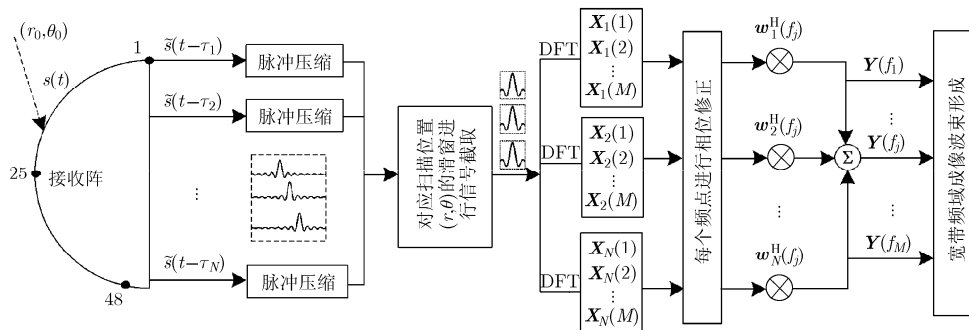


图 2 宽带 2 维成像流程图

给出滑窗 2 维成像在 r_0 处方位谱的仿真, 信号为 LFM 脉冲, 带宽为 90 ~ 110 kHz, 脉宽 $T = 2$ ms, 采样频率 $f_s = 500$ kHz。假设目标源和相干干扰相对于圆弧阵中心的位置分别为 $(5$ m, $70^\circ)$ 和 $(5$ m, $112^\circ)$, 干信比为 40 dB。利用圆弧的理论阵列流形矩阵设计二阶锥权值 w_{sp} , 设计的要求旁瓣级为 -20 dB, 零陷深度为 -70 dB, 零陷区间为 110° 至 115° 。取出 5 m 处的方位谱, 如图 3 所示。

图 3 中虚线为滑窗信号的常规方位谱, 滑窗信号表示按图 2 流程图中的步骤对脉冲压缩信号进行滑窗截取, 此时只能估计出强相干干扰的方位为 112° , 目标方位淹没在相干干扰的旁瓣中。实线为完整信号的二阶锥加权方位谱, 完整信号表示不进行滑窗, 将脉冲压缩后的信号进行完整截取, 此时阵列的接收信号矢量与阵列流形匹配, 可以看出相干干扰得到了很好的抑制, 且旁瓣均在 -20 dB 以下。点线为滑窗信号的二阶锥加权方位谱, 此时无法估计出目标的方位, 这是由于滑窗截取的阵列接收信号矢量 $s(\theta_0)$ 与导向矢量 $a(\theta_0)$ 不同, 二阶锥权值与成像滑窗的阵列接收信号矢量失配, 导致输出的方位谱无法满足设计的要求。

3.3 改进的二阶锥权值

由 3.2 节的分析与仿真可以看出, 宽带 2 维成像由于对脉冲压缩信号在时域上的滑窗, 致使窗内截取阵列的接收信号矢量与导向矢量不同, 与设计的二阶锥权值失配, 最终导致输出的方位谱旁瓣无法满足设计要求。改进方法如图 4 中在同一扫描距离上采用固定滑窗方式, 在 2 维成像之前, 通过计算机仿真计算出理论的阵列接收信号矢量, 代替阵列流形来进行二阶锥的权值设计, 这样就避免了阵列接收信号矢量与权值失配的问题。以图 3 的仿真条件为例, 距离 $r = 5$ m 处改进的具体步骤为:

步骤 1 仿真出目标位于 $r = 5$ m 时不同角度的来波信号, 对每个角度的阵列接收信号进行脉冲压缩。

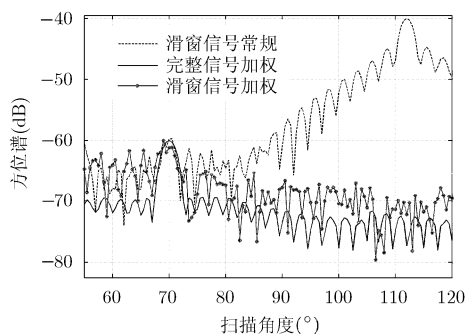


图 3 理想情况下的 5 m 处的方位谱

步骤 2 按照图 4 的固定滑窗方式分别对每个角度处的阵列脉冲压缩信号进行滑窗截取, 滑窗的起始点为 Q , 窗长度应尽可能包含所有通道的脉冲压缩相关峰, 此处取 $L = 70$ 。则式(12)的滑窗方式改为

$$H_i(t) = R_i(Q:Q + 70) \quad (15)$$

步骤 3 计算出截取信号 $H_i(t)$ 的导向矢量 $S_i(f_j)$, 再利用不同角度的阵列接收信号矢量代替阵列流形进行二阶锥权值 w_{sp} 的设计。

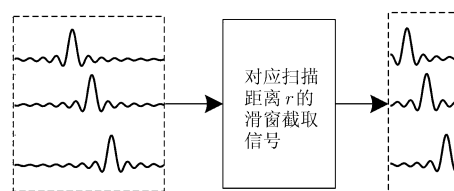


图 4 固定距离滑窗方式

仿真中波束设计的旁瓣级为 -20 dB, 零陷深度为 -70 dB, 零陷角度为 120° 至 125° 。目标位置为 $(5$ m, $70^\circ)$, 分别在有无相干干扰的情况下, 给出 2 维成像在 5 m 处的方位谱仿真结果如图 5, 图 6 所示。

图 5 中无相干干扰, 可以看出信噪比在 10 dB 和 0 dB 时, 滑窗常规方位谱和滑窗加权方位谱均可估计出目标的方位。但常规方位谱的旁瓣较高。二阶锥加权则将旁瓣级控制在 -20 dB, 但也牺牲了主瓣宽度, 且随着信噪比的下降, 二阶锥加权方位谱的旁瓣升高, 性能下降。图 6 中加入位置为 $(5$ m, $122^\circ)$ 的相干干扰, 在干信比 40 dB 和 60 dB 时, 常规方位谱只能估计出相干干扰的方向, 目标的主瓣已淹没在相干干扰的旁瓣中。而二阶锥加权方位谱仍能够很好地估计出目标方位。在干信比 40 dB 和 60 dB 时, 二阶锥加权方位谱的旁瓣级分别为 -18 dB 和 -9 dB。可见随着干信比的升高, 二阶锥加权方位谱的旁瓣升高, 性能下降。

4 2 维成像优化仿真及水池验证

4.1 2 维成像计算机仿真

利用改进的方法计算二阶锥权值对目标进行 2 维成像, 旁瓣级控制为 -20 dB, 零陷的深度为 -70 dB, 零陷角度为 120° 至 125° 。仿真中等强度的双目标位置分别为 $(5.0$ m, $90^\circ)$ 和 $(5.8$ m, $70^\circ)$, 信噪比 10 dB。在无相干干扰的情况下给出 2 维成像的结果如图 7 所示。

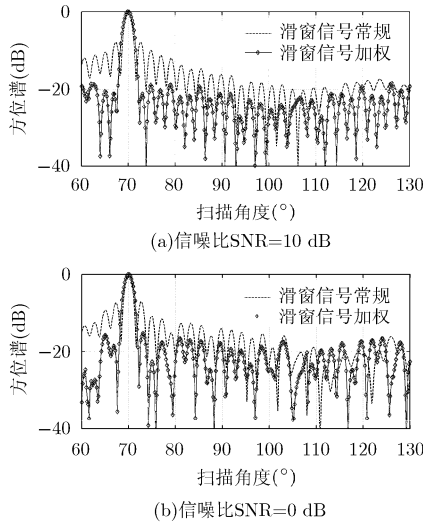


图 5 无干扰下 5 m 处的方位谱

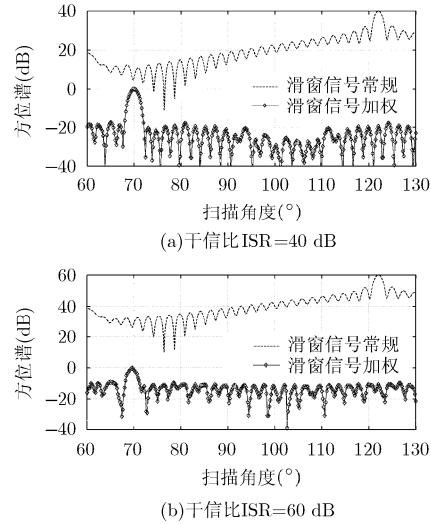


图 6 有干扰下 5 m 处的方位谱

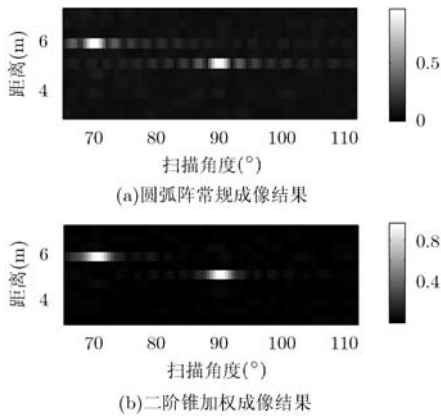


图 7 无干扰下的双目标 2 维成像

由图7可以看出，在无相干干扰的情况下，常规成像和二阶锥加权成像都可以分辨两个目标，但常规成像中目标旁瓣亮度较高，对后续的目标检测带来了困难，而二阶锥加权成像中，旁瓣级控制-20 dB 以下，但牺牲了主瓣宽度。若在(5 m, 122°)的位置分别加入干信比30 dB的相干干扰，给出2维成像结果如图8所示。

从图 8(a)可以看出加入强相干干扰后，常规成像只能估计出强相干干扰的位置，将图 8(a)调整 colorbar 后得到图 8(b)，可以看出 5 m 处的目标已经完全淹没在相干干扰的旁瓣中，5.8 m 处的目标还可以分辨，但也受到相干干扰距离旁瓣的影响。图 8(c)为二阶锥加权成像结果，可以看出二阶锥加权在控制旁瓣的同时，对相干干扰进行了有效的抑制。

4.2 水池验证

接收阵为半径0.2 m的圆弧阵，利用9-40通道进行宽带2维成像，目标源、干扰源与接收圆阵位于水

下2 m处，目标源和干扰源放置于相同的距离上，干信比为40 dB，水池实验配置如图9所示。发射信号为LFM脉冲，带宽为90~110 kHz，脉宽 $T = 2$ ms，采样频率 $f_s = 500$ kHz，二阶锥加权成像的旁瓣级控制为-20 dB，零陷的深度为-70 dB，零陷角度为 $120^\circ \sim 125^\circ$ 。

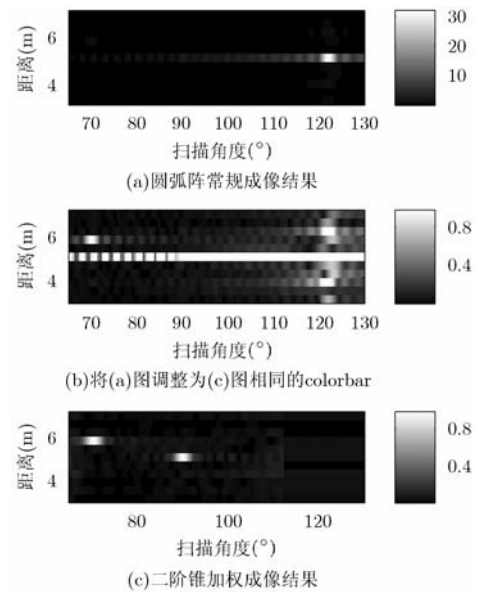


图 8 干信比为 30 dB 时的 2 维成像

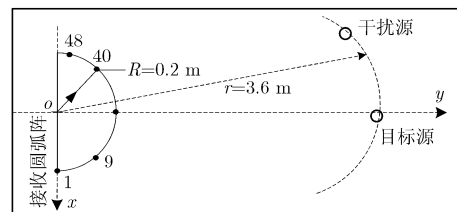


图 9 水池实验配置图

图10为水池数据的2维成像结果,图10(a)中只能够估计出干扰源的位置为(3.6 m, 122°),调整colorbar后得到图10(b),可以看出目标源的主瓣完全淹没在干扰源的旁瓣中,导致无法估计出目标的位置。图10(c)为二阶锥加权成像结果,干扰源得到了很好的抑制,估计出目标的位置为(3.6 m, 88°)。图11为目标成像在3.6 m处的方位谱,可以看出二阶锥加权的方位谱在抑制干扰的情况下很好地将旁瓣控制在-20 dB,验证了本文算法的有效性。

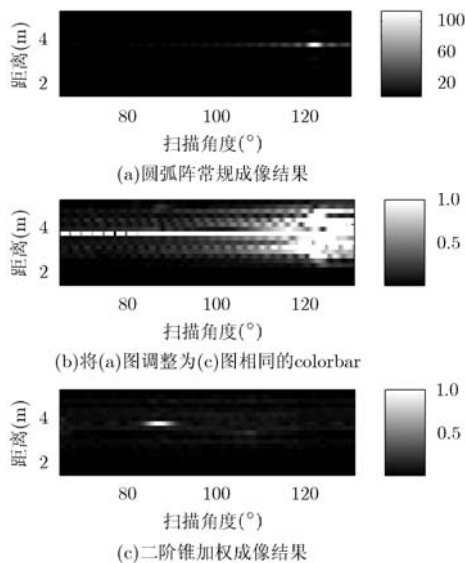


图10 2维成像结果

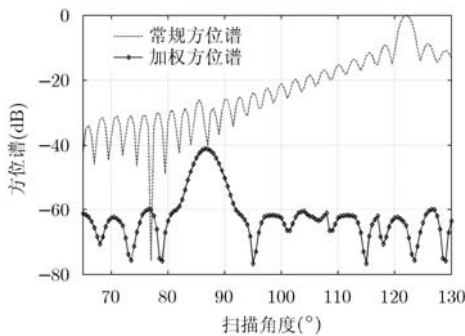


图11 3.6 m 处的方位谱

5 结论

本文利用二阶锥规划方式对圆弧阵进行波束优化,在波束上进行旁瓣控制和零陷设计,并将波束优化的思想与方位谱相结合,对2维成像进行优化。由于2维成像中对脉冲压缩信号的滑窗处理,方位谱旁瓣区域内的滑窗无法截取到完整的信号相关峰,阵列的接收信号矢量与利用阵列流形设计的二阶锥权值失配,最终导致输出的方位谱无法满足波束的旁瓣和零陷设计要求。本文通过仿真模拟出宽

带2维成像在不同距离上的滑窗过程,将窗内截取的理论阵列的接收信号矢量代替阵列流形来进行二阶锥的权值设计,解决了2维成像滑窗带来的二阶锥权值不匹配的问题,将二阶锥加权方式成功应用于2维成像的优化中。在对相干干扰抑制的同时很好地控制了目标成像的旁瓣,改善了后续目标的图像检测和识别的性能。

参考文献

- [1] Hansen R K, Castellani U, Murino V, *et al.* Mosaicing of 3D sonar data set techniques and applications[C]. IEEE Oceans Marine Technology Society, Washington DC, 2005: 2006-2011.
- [2] Becker K. A general approach to TMA observability from angle and frequency measurements[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1996, 32(1): 487-496.
- [3] 勇俊. 基于二维成像声呐的水下运动目标定位技术研究[D]. [博士论文], 哈尔滨工程大学, 2012.
Jun Yong. Research on positioning techniques of the underwater moving target track based on two-dimensional imaging sonar[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2012.
- [4] Wang F, Balakrishnan V, and Zhou P Y. Optimal array pattern synthesis using semidefinite programming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(5): 1172-1183.
- [5] 邹吉武. 多基地声呐关键技术研究[D]. [博士论文], 哈尔滨工程大学, 2012.
Zou Ji-wu. Study on multistatic sonar key technologies[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, 2012.
- [6] 杨益新. 声波束形成与波束域高分辨方位估计技术研究[D]. [博士论文], 西北工业大学, 2002.
Yang Yi-xin. Studies on beamforming and beamspace high resolution bearing estimation techniques in sonar systems[D]. [Ph.D. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [7] Olen C A and Compton R T. A numerical pattern synthesis algorithm for arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1990, 38(10): 1666-1676.
- [8] Ng B P, Er M H, and Kot C. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control[J]. *IEE Proceedings Microwave Antennas and Propagation*, 1994, 141(3): 162-166.
- [9] Palmese M and Trucco A. An efficient digital CZT beamforming design for near-field 3-D sonar imaging[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(3): 584-594.
- [10] Palmese M and Trucco A. Acoustic imaging of underwater embedded objects: signal simulation for three-dimensional sonar instrumentation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(4): 1339-1347.

- [11] 鄢社锋, 马远良. 二阶锥规划方法对于时空域滤波器的优化设计与验证[J]. 中国科学 E 辑信息科学, 2006, 36(2): 153-171.
Yan She-feng and Ma Yuan-liang. Second-order cone programming method for the optimization of spatial filter design and validation[J]. *SCIENCE IN CHINA, (series E: Information Sciences)*, 2006, 36(2): 153-171.
- [12] 杨益新, 孙超, 鄢社锋. 圆阵宽带恒定束宽波束形成的实验研究[J]. 声学学报, 2003, 28(6): 504-508.
Yang Yi-xin, Sun Chao, and Yan She-feng. Experimental studies on broadband constant beamwidth beamforming for circular arrays[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(6): 504-508.
- [13] 鄢社锋, 马远良. 基于二阶锥规划的任意传感器阵列时域恒定束宽波束形成[J]. 声学学报, 2005, 30(4): 309-315.
Yan She-feng and Ma Yuan-liang. Broadband constant beamwidth beamforming for arbitrary sensor arrays in time domain via second-order cone programming[J]. *Acta Acustica*, 2005, 30(4): 309-315.
- [14] 鄢社锋, 马晓川. 宽带波束形成器的设计与实现[J]. 声学学报, 2008, 33(4): 316-319.
Yan She-feng and Ma Xiao-chuan. Designs and implementations of broadband beamformers[J]. *Acta Acustica*, 2008, 33(4): 309-315.
- [15] 梁国龙, 马巍, 范展. 矢量声呐高速运动目标稳健高分辨方位估计[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144302-144306.
Liang Guo-long, Ma Wei, and Fan Zhan. A high resolution robust localization approach of high speed target based on vector sonar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 144302-144306.
- [16] 杨涛, 苏涛, 何学辉. 基于波束域导向矢量估计的稳健自适应波束形成方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2758-2763.
Yang Tao, Su Tao, and He Xue-hui. Robust adaptive beamforming based on beamspace steering vector estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2758-2763.
- [17] 徐晓男, 马启明, 杜栓平. 波束空间能量约束的稳健自适应波束形成[J]. 声学学报, 2013, 38(3): 258-261.
Xu Xiao-nan, Ma Qi-ming, and Du Shuan-ping. Robust adaptive beamforming based on beam space power constraint[J]. *Acta Acustica*, 2013, 38(3): 258-261.
- [18] 范展, 梁国龙, 王逸林. 一种零陷展宽鲁棒自适应波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2764-2770.
Fan Zhan, Liang Guo-long, and Wang Yi-lin. Robust adaptive beamforming with null widening[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2764-2770.
- 黄 聪: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为水下阵列信号处理.
孙大军: 男, 1972 年生, 教授, 研究方向为水下信道与声呐环境、水下目标探测与定位.
张殿伦: 男, 1967 年生, 教授, 研究方向为水声定位与导航.
滕婷婷: 女, 1982 年生, 讲师, 研究方向为水下目标定位成像.