

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^{*}

鄢社锋 马远良 孙超

(西北工业大学声学工程研究所 西安 710072)

2003 年 11 月 10 日收到

2004 年 4 月 7 日定稿

摘要 针对常规波束运用到实际传感器阵列时旁瓣较高这一缺点,提出了适用于任意几何形状和阵元指向性的传感器阵列的两种旁瓣约束优化波束形成方法。一种是主瓣宽度约束条件下的最低旁瓣波束形成,另一种是在所能允许的最高旁瓣约束条件下的高增益波束形成。通过对加权向量范数进行约束,提高波束形成的稳健性。这两种优化波束形成问题都可以写成二阶锥 (Second-Order Cone) 约束优化的形式,然后利用已有的内点方法 (Interior-Point Methods) 求出其数值解。计算机仿真和湖上实验数据处理结果表明,该低旁瓣波束形成方法相比于常规波束和其它基于自适应波束形成的旁瓣控制方法,在同等主瓣宽度的情况下可以获得更低的旁瓣级;该高增益波束形成方法在同等旁瓣级约束条件下可以获得更高的阵增益,而且旁瓣级能够满足设定要求。

PACS 数: 43.30, 43.60

Beampattern optimization for sensor arrays of arbitrary geometry and element directivity

YAN Shefeng MA Yuanliang SUN Chao

(Institute of Acoustic Engineering, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Received Dec. 16, 2003

Revised Apr. 7, 2004

Abstract Two optimal beamforming approaches for sensor arrays of arbitrary geometry and element directivity are developed. The first one minimizes the sidelobe level while keeping the distortionless response in the direction of desired signal and maintaining the mainlobe width. This approach can obtain lower sidelobe level compared to other adaptive-based low-sidelobe beamforming algorithms while keeping the same beamwidth. The second approach maximizes the array gain while keeping mainlobe direction and controlling the maximum sidelobe level which is strictly guaranteed to be lower than a prescribed value. The approach can obtain higher array gain compared to the adaptive-based low-sidelobe beamforming algorithms while keeping the same sidelobe level. Array weight norm constraint is used to increase the robustness of the two optimal beamforming against random errors. Both of the optimal beamforming problems are converted to a convex form as the so-called second-order cone programming and easily solved using well-developed interior-point methods. Results of computer simulation and lake-experiment for a circular array show superior performance of the proposed approaches developed in this paper in comparison to the existing adaptive-based algorithms.

引言

在阵列信号处理中,旁瓣约束一直是波束形成

器设计中考虑的一个重要问题。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。但是对于常规波束形成方法,当它运用于实际基阵系

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (60072025, 10304015)

统中时, 由于各传感器受到它所安装的基阵架结构等影响, 对各方面信号响应幅度大小并不相同, 波束图就会发生畸变, 主要表现为旁瓣升高。

到目前为止, 已经出现了大量的旁瓣控制波束形成算法。对于由各向同性阵元组成的均匀分布线列阵, Dolph 提出可以采用 Chebyshev 窗函数对线列阵进行加权, 获得较低的旁瓣级^[1]。对于任意结构的基阵, 马远良提出了任意结构形状传感器阵方向图的最佳化方法, 用“凹槽噪声场”原理获得主瓣宽度约束下最低旁瓣级加权向量的数值解^[2]。Olen 等提出了静态波束图的数字综合方法^[3], 该方法的基本原理与文献 2 相同, 但对旁瓣区域内噪声源的自适应调整做了进一步的讨论。基于该方法, 文献 4 通过反复迭代过程获得主瓣宽度一定情况下的最低均匀旁瓣级, 文献 5 和文献 6 提出了存在基阵误差情况下自适应阵的精确旁瓣控制方法, 文献 7 和文献 8 将其扩展到宽带低旁瓣波束形成。

但是, Chebyshev 窗函数法只适用于均匀线列阵, 对其它结构的基阵不适用。基于自适应波束形成的旁瓣控制方法, 都存在一个迭代收敛的问题, 迭代步长难以选择, 过大的步长导致不稳定, 而过小的步长使得收敛速度太慢。该类方法总存在收敛误差, 而且没有考虑旁瓣控制对阵增益的影响, 不能保证获得较高的阵增益。文献 9 采用多线性约束的自适应波束形成方法, 将旁瓣峰约束到期望的旁瓣级, 并且让波束输出能量最小。但是该方法受到基阵自由度数量的限制, 对于旁瓣峰多于基阵自由度的情况无能为力。而且利用了太多的自由度, 会降低基阵的检测能力^[10]。

近来出现了一些将优化理论运用于旁瓣控制的方法, 文献 11 采用非线性优化方法实现波束旁瓣控制。文献 12 采用凸优化 (Convex Optimization) 方法实现波束图数字综合。文献 13 采用半无限二次规划算法 (Semi-Infinite Quadratic Programming Algorithm), 不需要对波束图进行离散化就能实现波束图综合。但是这几种方法都比较复杂, 计算量比较大, 实现比较困难。

最近, 一些内点方法 (Interior-Point Methods) 有了较大的发展^[14,15]。作为一种内点方法, 二阶锥 (Second-Order Cone) 约束方法已经运用于稳健波束形成^[16], 而且该方法的计算量很小^[14], 计算结果精确。本文利用二阶锥约束的方法, 将其运用到旁瓣约束波束形成, 给出了两种旁瓣约束波束形成方法, 一种是在一定主瓣宽度约束下的最低旁瓣波束形成, 另一种是一定旁瓣级约束下的高增益波束形成。通

过对加权向量范数进行约束, 提高波束形成的稳健性。第一种方法可以在波束主瓣宽度、旁瓣级和稳健性之间进行最佳折衷, 第二种方法在波束旁瓣级、稳健性和阵增益之间最佳折衷。这是其它已有的各种优化波束形成方法所无法实现的。

1 波束形成器的数学表述

对于一个由 N 个阵元组成的基阵, 各传感器的位置三维坐标为 $\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, $(\cdot)^T$ 表示转置。若信号方向为球面角 (θ, ϕ) , 则该方向的单位向量为 $\mathbf{u} = [\sin \phi \cos \theta, \sin \phi \sin \theta, \cos \phi]^T$, 则基阵对从 (θ, ϕ) 方向入射到基阵的窄带信号的响应向量为:

$$\mathbf{d}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} d_1(\theta, \phi) \exp(j2\pi f \mathbf{u}^T \mathbf{r}_1 / c) \\ d_2(\theta, \phi) \exp(j2\pi f \mathbf{u}^T \mathbf{r}_2 / c) \\ \vdots \\ d_N(\theta, \phi) \exp(j2\pi f \mathbf{u}^T \mathbf{r}_N / c) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 f 是信号频率, $d_i(\theta, \phi)$ 是第 i 个阵元对 (θ, ϕ) 方向信号的响应幅度大小, c 为声速。

基阵对 (θ, ϕ) 方向信号的波束响应为:

$$p(\theta, \phi) = \mathbf{d}^H(\theta, \phi) \mathbf{w}, \quad (2)$$

其中 \mathbf{w} 是波束形成器的复加权矢量, $(\cdot)^H$ 表示复共轭转置。

如果仅对水平波束指向性感兴趣, 则令 $\phi = 90^\circ$ 。将水平面所有方向 Θ 上入射信号的响应向量放置在矩阵 $\mathbf{D}(\Theta)$ 中, 得到基阵的阵列流形 (array manifold), 矩阵为 (省略 ϕ):

$$\mathbf{D}(\Theta) = [\mathbf{d}(\theta_1), \mathbf{d}(\theta_2), \dots, \mathbf{d}(\theta_M)], \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M \in \Theta, \quad (3)$$

其中 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$ 为离散化的方位角, 往往覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。基阵的水平方位波束图表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}(\Theta) = |\mathbf{D}^H(\Theta) \mathbf{w}| = [|p(\theta_1)|, |p(\theta_2)|, \dots, |p(\theta_M)|]^T, \\ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M \in [0, 360), \end{cases} \quad (4)$$

对于由各向同性阵元组成的基阵, 其阵列流形可以根据各阵元所在位置得到。如果阵元的位置存在误差, 或阵元不满足各向同性条件, 则得到的基阵阵列流形会产生偏差。而如果基阵的位置未知, 阵列流形就更难得到。另外, 阵元一般安装在基阵架上, 由于基阵架对信号的遮挡和散射作用, 也使得各阵元对各方面信号的响应大小不同。一个比较好的方法是直接运用试验的方法测出基阵的阵列流形^[17]。通过测量基阵在空间一些离散方位点上的接收向量, 来表示基阵的实测阵列流形。通过入射场和散射场的

叠加, 用理论计算的方法获得阵列流形原则上是可行的, 但对于存在复杂结构散射的情况能否获得足够精确的结果尚待研究。本文以下的研究是假定阵列流形为已知, 不论用何种方法获得阵列流形。

2 基于二阶锥优化波束形成

SeDuMi^[15] 是 Sturm 开发的用于处理对称锥优化问题的 MATLAB 工具箱, 可以用来求解二阶锥和线性约束下的凸优化问题, 使用十分方便, 具有计算量小和计算精确等优点。将其用于处理波束优化问题, 可以达到寻优方法规范、精确性高的目的。对于优化问题无解的情况也能自动判别, 以便修正参数继续计算。在 SeDuMi 中, 标准的凸锥优化问题形式定义为:

$$\max \mathbf{b}^T \mathbf{y} \quad \text{subject to} \quad \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{y} \in K \quad (5)$$

这里 \mathbf{y} 中包含有期望变量, \mathbf{A} 是任意矩阵, \mathbf{b} 和 \mathbf{c} 是任意向量, K 是一个对称锥集合。 \mathbf{A} , \mathbf{b} 和 \mathbf{c} 的维数必须匹配, 且都可以为复数。二阶锥和零锥都是对称锥的子集, q 维二阶锥定义为:

$$Q\text{cone}^q \triangleq \left\{ \begin{bmatrix} t \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} \middle| t \in \mathbb{R}, \mathbf{x} \in \mathbb{C}^{q-1}, t \geq \|\mathbf{x}\| \right\} \quad (6)$$

图 1 给出了实数域三维 ($q=3$) 二阶锥, 从图中可以看出二阶锥的几何意义。二阶锥优化就是在该锥内寻找满足目标函数最大化的最优点。

等式约束可以表示为零锥, 零锥定义为:

$$\{0\} \triangleq \{x \in C \mid |x| = 0\}, \quad (7)$$

其中 C 为复数集。如果约束问题可以写成:

$$\max \mathbf{b}^T \mathbf{y} \quad \text{subject to} \quad \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{y} \in \{0\}^{q_1} \times Q\text{cone}^{q_2} \quad (8)$$

的形式, 则可以很容易通过 SeDuMi 求出其数值解。

式 (8) 中的约束表示有 q_1 个等式约束和另外 q_2 个元素位于二阶锥。

$$1 - \mathbf{d}^H(\theta_s) \mathbf{w} = 1 - [0 \quad \mathbf{d}^H(\theta_s)] \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_1 - \mathbf{A}_1^T \mathbf{y} \in \{0\}, \quad (11a)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \mathbf{d}^H(\theta_i) \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -1 & \mathbf{0}^T \\ 0 & -\mathbf{d}^H(\theta_i) \end{bmatrix} \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_{1+i} - \mathbf{A}_{1+i}^T \mathbf{y} \in Q\text{cone}_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (11b)$$

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_{2+I} - \mathbf{A}_{2+I}^T \mathbf{y} \in Q\text{cone}_{I+1}^{1+N}. \quad (11c)$$

定义 $\mathbf{c} \triangleq [\mathbf{c}_1^T, \mathbf{c}_2^T, \dots, \mathbf{c}_{1+I}^T, \mathbf{c}_{2+I}^T]^T$, $\mathbf{A}^T \triangleq [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_{1+I}, \mathbf{A}_{2+I}]^T$, 则低旁瓣波束形成可以表示为标准二阶锥约束形式:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{y}} \quad & \mathbf{b}^T \mathbf{y} \quad \text{subject to} \\ & \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{y} \in \{0\} \times Q\text{cone}_1^2 \times Q\text{cone}_2^2 \times \dots \times \\ & Q\text{cone}_I^2 \times Q\text{cone}_{I+1}^{1+N} \end{aligned} \quad (12)$$

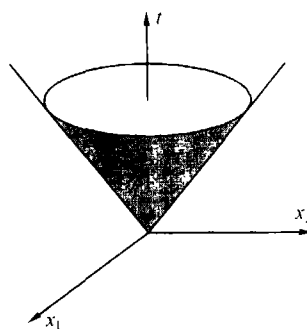


图 1 实数域三维二阶锥

2.1 最低旁瓣波束形成

对于低旁瓣波束形成, 可以在保证波束对观察方向的响应为 1 的条件下, 让最大旁瓣值最小。同时对权向量的范数进行约束^[18,19], 以保证波束形成器对随机误差的稳健性。因此可以写成:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}} \quad & \max_{|\theta - \theta_s| > \Delta} |p(\theta)|, \\ \text{subject to} \quad & p(\theta_s) = 1, \\ & \|\mathbf{w}\| \leq \xi, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 θ_s 表示观察方向, Δ 为波束主瓣半宽度, ξ 为权向量范数上限, 加权向量范数越小, 波束形成稳健性越高。引入非负实变量 y_1 , 令 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, I)$ 表示旁瓣部分的离散化的 I 个方向 (可以让这 I 个方位均分旁瓣方位), 则上式可以写成:

$$\begin{aligned} \min_{y_1, \mathbf{w}} \quad & y_1, \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{d}^H(\theta_s) \mathbf{w} = 1, \\ & |\mathbf{d}^H(\theta_i) \mathbf{w}| \leq y_1, \\ & (|\theta_i - \theta_s| > \Delta, i = 1, 2, \dots, I) \\ & \|\mathbf{w}\| \leq \xi. \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\mathbf{y} = [y_1, \mathbf{w}^T]^T$, $\mathbf{b} = [-1, \mathbf{0}^T]^T$, 使 $y_1 = -\mathbf{b}^T \mathbf{y}$ 。其中 $\mathbf{0}$ 是 $N \times 1$ 的零向量, 对于式 (10) 中的约束可以写成:

先给定 Δ 值, 将 $\mathbf{d}(\theta_s)$, $\mathbf{d}(\theta_i)(i=1,2,\cdots,I)$ 和 ξ 代入上列各式, 即可应用已有的 SeDuMi 求解出 \mathbf{y} , 进而得到优化波束加权向量 \mathbf{w} , \mathbf{w} 为 \mathbf{y} 的第 2 ~ $N+1$ 个分量。

2.2 旁瓣控制的高增益波束形成

让基阵的阵增益最大化, 可以表示为下面的约束:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w}, \quad \text{subject to } \mathbf{d}^H(\theta_s) \mathbf{w} = 1, \quad (13)$$

其中 \mathbf{R}_n 是噪声协方差矩阵。对 \mathbf{R}_n 进行 Cholesky 分解, 即:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{U}^H \mathbf{U},$$

得到

$$\mathbf{w}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w} = (\mathbf{U} \mathbf{w})^H (\mathbf{U} \mathbf{w}) = \|\mathbf{U} \mathbf{w}\|^2, \quad (14)$$

$$1 - \mathbf{d}^H(\theta_s) \mathbf{w} = 1 - [0 \quad \mathbf{d}^H(\theta_s)] \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_1 - \mathbf{A}_1^T \mathbf{y} \in \{0\}, \quad (16a)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \mathbf{U} \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} - & 0^T \\ 0 & -\mathbf{U} \end{bmatrix} \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_2 - \mathbf{A}_2^T \mathbf{y} \in Q\text{cone}_1^{N+1}, \quad (16b)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i \\ \mathbf{d}^H(\theta_i) \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0^T \\ 0 & -\mathbf{d}^H(\theta_i) \end{bmatrix} \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_{2+i} - \mathbf{A}_{2+i}^T \mathbf{y} \in Q\text{cone}_{1+i}^2 \quad (i=1,2,\cdots,I) \quad (16c)$$

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0^T \\ 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{y} \triangleq \mathbf{c}_{3+I} - \mathbf{A}_{3+I}^T \mathbf{y} \in Q\text{cone}_{I+2}^{1+N}. \quad (16d)$$

定义 $\mathbf{c} \triangleq [\mathbf{c}_1^T, \mathbf{c}_2^T, \cdots, \mathbf{c}_{2+I}^T, \mathbf{c}_{3+I}^T]^T$, $\mathbf{A}^T \triangleq [\mathbf{A}_1^T, \mathbf{A}_2^T, \cdots, \mathbf{A}_{2+I}^T, \mathbf{A}_{3+I}^T]^T$, 旁瓣控制高增益约束可以表示为标准的二阶锥约束形式:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{y}} \mathbf{b}^T \mathbf{y} \quad \text{subject to} \\ & \mathbf{c} - \mathbf{A}^T \mathbf{y} \in \{0\} \times Q\text{cone}_1^{N+1} \times Q\text{cone}_2^2 \times \cdots \times \\ & \quad Q\text{cone}_{1+I}^2 \times Q\text{cone}_{2+I}^{1+N}. \end{aligned} \quad (17)$$

将 $\mathbf{d}(\theta_s)$, $\mathbf{d}(\theta_i)(i=1,2,\cdots,I)$, δ 和 ξ 值代入上列各式, 即可应用 SeDuMi 求解出 \mathbf{y} , 进而得到优化波束加权向量 \mathbf{w} , \mathbf{w} 为 \mathbf{y} 的第 2 ~ $N+1$ 个分量。

3 设计实例

我们给出的主瓣或旁瓣约束波束形成器可以适用于任意结构的基阵, 下面以一圆环形阵为例加以说明。假设一半径为 1.5 m 的圆环形阵, 24 个阵元均匀分布在其圆周, 定义圆心为极坐标原点, 某两个阵元中间所在方向为 0° 方向。从 0° 沿顺时针方向依次为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 逆时针方向依次为 $0^\circ \sim -180^\circ$, -180° 与 180° 点重合。从 0° 沿顺时针方向的各阵元依次为 1#, 2#, ..., 24# 阵元。基阵阵形结构如图 2 所示。

以下分别对第 2 节提出的两种优化波束形成方法进行计算机仿真, 并将本文方法与文献 3 中的方

对于旁瓣控制下的高增益波束形成, 可以在上式中再加入旁瓣约束, 并权向量的范数进行约束。引入非负实变量 y_1 , 其约束式可以表示为:

$$\begin{aligned} & \min_{y_1, \mathbf{w}} (y_1), \\ & \text{subject to } \mathbf{d}^H(\theta_s) \mathbf{w} = 1, \\ & y_1 \geq \|\mathbf{U} \mathbf{w}\|, \\ & \delta_i \geq |\mathbf{d}^H(\theta_i) \mathbf{w}|, (|\theta_i - \theta_s| > \Delta, i=1,2,\cdots,I) \\ & \|\mathbf{w}\| \leq \xi, \end{aligned} \quad (15)$$

其中 δ_i 确定了波束的旁瓣, 并且旁瓣区域不同方位处可以有不同的值, 即不一定是等旁瓣。

令 $\mathbf{y} = [y_1, \mathbf{w}^T]^T$ 和 $\mathbf{b} = [-1, 0^T]^T$, 对于式 (15) 中的约束, 可以写成:

法进行比较。为方便起见, 本文中将文献 3 中的方法也称为“凹槽噪声法”。

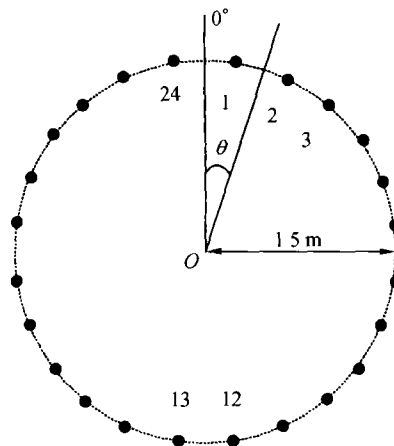


图 2 圆环阵结构

3.1 低旁瓣波束形成

假设信号频率为 1280 Hz, 在 30° 方向形成波束。得到常规波束图 (各阵元均匀加权) 如图 3 所示。可以看出, 其旁瓣级比较高, 大约 -8 dB 左右。如果要进行低旁瓣波束形成, 期望旁瓣级为 -25 dB。运用“凹槽噪声法”得到的波束图如图 4 中虚线所示。由于该方法存在收敛误差, 最后得到的旁瓣大约为 -24 dB。而采用本文的低旁瓣波束形成方法, 设定主瓣宽度

与“凹槽噪声法”产生的波束主瓣宽度相同,并保证权向量范数小于 0.4,可以得到最低 -32 dB 的旁瓣级,比“凹槽噪声法”获得的旁瓣低 8 dB,并且各旁瓣峰精确在同一水平,如图 4 中实线所示。由于对于同一种方法,降低旁瓣级就会同时增加波束宽度。如果本文方法只要求获得与“凹槽噪声法”相同的旁瓣级,则它可以得到更窄的波束宽度。由此可见,本文的低旁瓣波束形成相比于“凹槽噪声法”具有更好的性能。

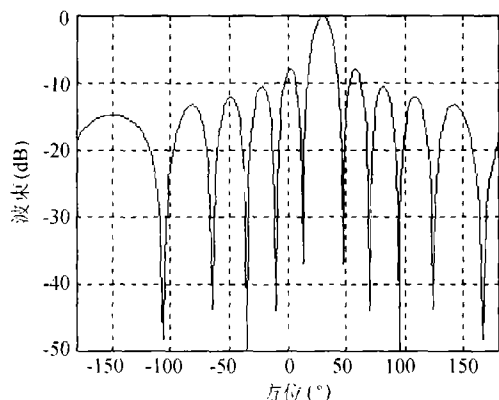


图 3 常规波束图

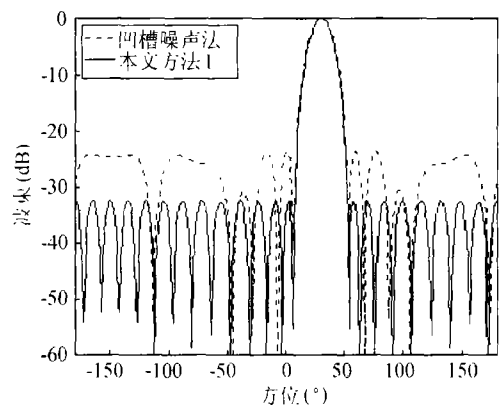


图 4 低旁瓣波束图

3.2 旁瓣控制的高增益波束形成

下面再考虑旁瓣约束波束形成器的阵增益。对于上面所述的圆环形阵,信号频率仍假设为 1280 Hz。如果假设期望旁瓣级为 -13 dB,运用“凹槽噪声法”,得到的波束图如图 5 中虚线所示(实际旁瓣级 -12.6 dB)。该方法得到的波束图中,旁瓣峰大致在同一水平(-12.6 dB)。而采用本文 2.2 的方法,得到的波束图如图 5 中实线所示。在本方法中,假设噪声场是空间均匀噪声场,并且为了保证基阵波束形成的稳健性,使权向量范数小于 0.7。由于该方法是满足最大旁瓣级约束下的最大阵增益,旁瓣峰不一定位于同一水平,但是能够保证最高旁瓣级精确低于 -13 dB,并且得到的主瓣宽度小于“凹槽噪声法”得到的主瓣宽度。

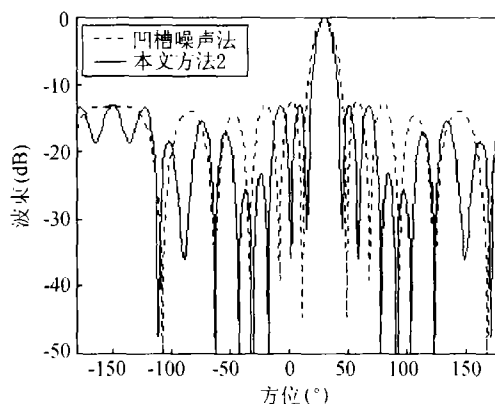


图 5 旁瓣约束高增益波束图

在该频率,常规波束形成的阵增益为 12.3 dB,“凹槽噪声法”旁瓣约束波束形成的阵增益为 12.1 dB,而本文方法得到阵增益 14.1 dB,其空间增益优越性非常明显。图 6 给出了在 -13 dB 旁瓣约束下得到的 800 ~ 1600 Hz 各频率下这三种波束形成的阵增益曲线。从图中可以看出,“凹槽噪声法”旁瓣约束获得的阵增益要低于常规未约束波束形成。而本文旁瓣约束波束形成方法比“凹槽噪声法”和常规波束形成都具有更高的阵增益,甚至在某些频率高于 13.8 dB($10\lg N$)。

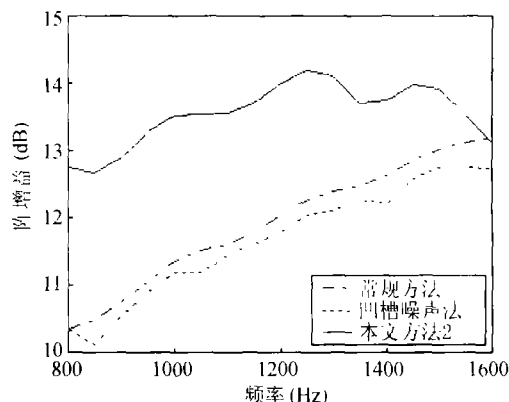


图 6 三种波束形成各频率阵增益比较

4 实验分析

2001 年 9 月在水库进行了实验,实验的主要目的是测量安装在基阵架上各阵元在水下的阵列流形。实验所用基阵各参数与第 3 节仿真中相同。首先从 -180° 方向远场发射信号频率为 1280 Hz 的 CW 脉冲信号,通过各阵元接收数据计算出基阵对该方向的响应向量 $d(-180)$,具体计算方法参见文献 17 或文献 20 附录。然后将基阵逆时针转动 2.5° ,继续接收远场 CW 脉冲信号,计算出 $d(-177.5)$ 。按此方法,每次将基阵逆时针转动 2.5° ,依次计算出 $d(-175)$, $d(-172.5)$, ..., $d(180)$ 等 145 个方向的基阵响应向

量, 继而得到基阵在这些离散方位的阵列流形。图 7 中给出了 5# 阵元和 9# 阵元对各方向的接收响应幅度, 该幅度以所有阵元接收到的最大幅度进行归一化。从图中可以看出, 阵元受到基阵架结构的影响还是比较严重的, 阵元是各向不同性的。

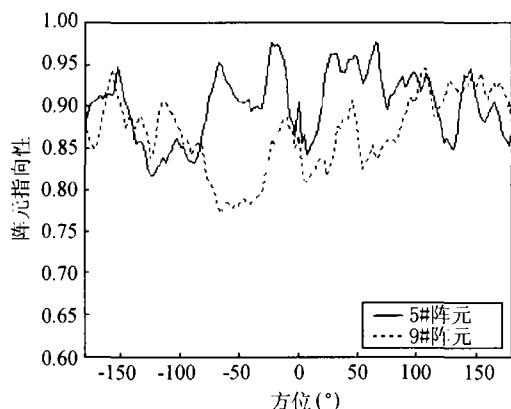


图 7 阵元指向性

图 8 给出了分别运用常规波束形成和本文中的低旁瓣波束形成两种方法处理湖试数据的结果。虚线是常规波束图, 实线是保证波束主瓣半宽度为 17.5° 时得到的最低旁瓣波束图, 各旁瓣峰精确在同一水平, 为 -25.3 dB。从图中可以非常明显看出, 本文低旁瓣波束形成能获得远低于常规波束的旁瓣级, 而且主瓣宽度相对于常规波束增加很小。图 9 给出了分别运用常规波束形成和本文中的旁瓣约束高增益波束形成两种方法处理湖试数据的结果, 虚线是常规波束图, 实线是在满足旁瓣低于 -13 dB 的条件下, 使得阵增益最大化得到的波束图, 此时旁瓣精确低于 -13 dB。而且主瓣宽度低于常规波束图。由此可见, 对于湖试数据得到的波束, 其旁瓣级都可以精确满足设计要求, 本文的两种优化波束形成方法都可以适用于真实水声环境下的基阵系统。图 10 给出了非等旁瓣约束下得到的波束图, 图中可以看出得到的波束图旁瓣能够精确低于设定值。

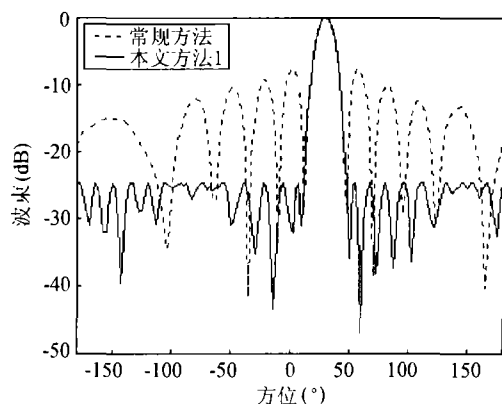


图 8 常规波束与低旁瓣波束比较

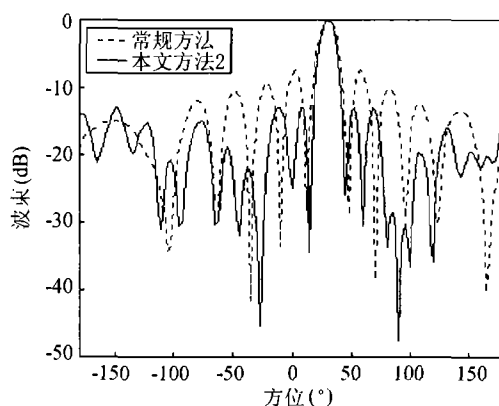


图 9 常规波束与旁瓣约束高增益波束比较

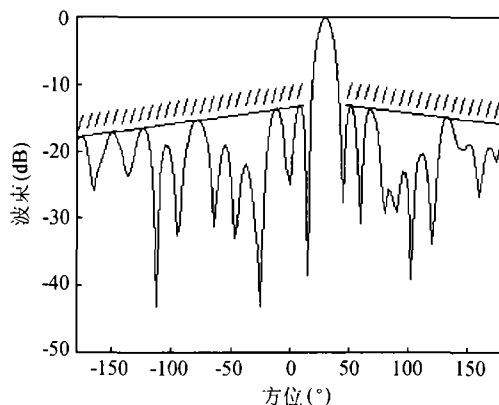


图 10 非等旁瓣约束高增益波束

5 结论

针对常规波束运用到实际传感器阵列时旁瓣较高这一缺点, 给出了基于二阶锥优化的两种优化波束形成新方法。一种是在波束主瓣宽度约束下使波束旁瓣级最小化, 另一种是在波束最大旁瓣满足设计要求的情况下使基阵空间增益最大化。这两种优化波束形成先写成约束条件下的最优化问题形式, 然后转换为已有优化软件 SeDuMi 所要求的形式, 最后利用该软件求出数值解, 得到要求的波束形成权矢量。通过计算机仿真, 验证了该低旁瓣波束形成方法可以在相同主瓣宽度的条件下获得最低的旁瓣级, 旁瓣约束高增益波束形成方法可以在满足所能允许的最高旁瓣级约束下获得最高的阵增益。这两种方法都得到了实测湖试数据的验证, 处理结果完全满足设计要求, 具有非常好的实际应用前景。

6 致谢

感谢中船工业集团海鹰水声中心和西北工业大学声学工程研究所参加湖试的科研人员, 他们为实验数据的获取作了大量工作。

参 考 文 献

- 1 Dolph C L. A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and sidelobe level. *proc. IRE*, 1946; **34**(6): 335—348
- 2 马远良. 任意结构形状传感器阵方向图的最佳化. *中国造船*, 1984; **87**(4): 78—85
- 3 Olen C A, Compton R T Jr. A numerical pattern synthesis algorithm for arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1990; **38**(8): 1666—1676
- 4 Zhou P Y, Ingram M A, Anderson P D. Synthesis of minimax sidelobes for arbitrary arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1998; **46**(9): 1759—1760
- 5 WU Renbiao, BAO Zheng, MA Yuanliang. Control of peak sidelobe level in adaptive arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1996; **44**(8): 1341—1347
- 6 WU Renbiao, MA Yuanliang, James R D. Array pattern synthesis and robust beamforming for a complex sonar system. *IEE Proc. -Radar, Sonar Navig.*, 1997; **144**(5): 370—376
- 7 鄢社锋, 马远良, 倪晋平. 圆环形最佳阵宽带波束旁瓣控制技术. 2001 年全国水声学学术会议论文集, 山西大同, 2001, 声学技术, 2001; **20**(增): 44—46
- 8 杨益新, 孙 超, 马远良. 宽带低旁瓣时域波束形成. *声学学报*, 2003; **28**(4): 331—338
- 9 Tseng C Y, Griffiths L J. A simple algorithm to achieve desired patterns for arbitrary arrays. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992; **40**(9): 2737—2746
- 10 Song H, Kuperman W A, Hodgkiss W S *et al.* Null broadening with snapshot-deficient covariance matrices in passive sonar. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2003; **28**(2): 250—261
- 11 Jiao Y C, Wei W Y, Huang L W, Wu H S. A new low-side-lobe pattern synthesis technique for conformal arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1993; **41**(5): 824—831
- 12 Lebrete H, Boyd S. Antenna array pattern synthesis via convex optimization. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1997; **45**(3): 526—532
- 13 Nordebo S, Zang Zhuquan, Claesson I. A semi-infinite quadratic programming algorithm with applications to array pattern synthesis. *IEEE Trans. Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 2001; **48**(3): 225—232
- 14 Lobo M, Vandenberghe L, Boyd S *et al.* Applications of second-order cone programming. *Linear Algebra Appl.*, 1998: 193—228
- 15 Sturm J F. Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. *Optim. Meth. Softw.*, 1999; **11,12** 期合刊: 625—653
- 16 Vorobyov S A, Gershman A B, Luo Z Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2003; **51**(2): 313—324
- 17 鄢社锋. 水听器阵超增益特性及信号处理研究. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2001
- 18 Cox H, Zeskind R, Kooij T. Practical supergain. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1986; **34**(3): 393—398
- 19 鄢社锋, 马远良. 基于二阶锥规划的稳健高增益波束形成. 2004 年全国水声学学术会议论文集, 安徽黄山, 2004, 声学技术, 2004; **23**(增): 133—135
- 20 杨益新, 孙 超, 鄢社锋等. 圆阵宽带恒定束宽波束形成的实验研究. *声学学报*, 2003; **28**(6): 504—508