

DOI: 10.7652/xjtuxb201404019

采用幅度响应约束的鲁棒自适应波束形成算法

吴仁斌^{1,2}, 姚敏立³, 贾维敏¹, 金伟¹, 邹翔⁴

(1. 第二炮兵工程大学 907 教研室, 710025, 西安; 2. 中国人民解放军 96111 部队, 715400, 陕西韩城;
3. 第二炮兵工程大学 403 教研室, 710025, 西安; 4. 电子工程学院博士后流动站, 230037, 合肥)

摘要: 针对大导向矢量失配误差造成传统自适应波束形成算法鲁棒性下降的问题, 提出采用幅度响应约束的鲁棒自适应波束形成算法。该算法首先对接收数据协方差矩阵失配进行建模优化, 然后根据已知的多径相干信号大致来波方向信息对波束主瓣进行幅度响应约束, 并利用所提引理将优化问题转化为迭代二阶锥规划问题, 最后对权矢量直接进行求解获得最佳值。仿真结果表明: 该算法能够针对多径相干信号形成多波束主瓣, 自由控制波束主瓣宽度和纹波水平。当期望信号的方向偏差达到 3.5° 、输入信干噪比在 $-5\sim 10$ dB 范围内变化时, 该算法的阵列输出信干噪比优于不确定集类算法 $0\sim 6$ dB, 对大导向矢量失配误差鲁棒性更高。

关键词: 波束形成; 鲁棒性; 多径相干信号; 幅度响应约束

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0109-06

Robust Adaptive Beamforming Algorithm by Constraints on Magnitude Response

WU Renbin^{1,2}, YAO Minli³, JIA Weimin¹, JIN Wei¹, ZOU Xiang⁴

(1. Staff Room 907, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; 2. Unit 96111 of PLA, Hancheng, Shaanxi 715400, China; 3. Staff Room 403, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China; 4. Post-Doctoral Research Center, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Aiming at degradation of robustness caused by large steering vector mismatch in the traditional adaptive beamforming algorithms, a robust adaptive beamforming algorithm by constraints on magnitude response is proposed. The receiving covariance matrix mismatch is modeling optimized, and the main lobe magnitudes are then constrained according to the known direction information of multiple coherent signals. The optimization case is converted into an iterative second-order cone programming (SOCP) via the presented lemma. Simulations show that this method enables to form beam main lobe in the direction of multiple coherent signals, and to control the width and the ripple level of the main lobe flexibly. When direction mismatch of the desired signal reaches 3.5° and the signal to noise ratio (SNR) varies within -5 dB to 10 dB, the array output signal to interference and noise ratio (SINR) in the proposed algorithm is superior to that in the uncertainty algorithm by $0\sim 6$ dB, and this algorithm is endowed with higher robustness against large steering vector mismatch.

Keywords: beamforming; robustness; multiple coherent signals; constraints on magnitude response

信号在传输过程中往往会出现多径传输效应,导致阵列的接收数据中包含与期望信号相干的多径信号,此时利用传统的自适应波束形成技术会出现信号相互抵消(信号相消)的现象^[1-2],导致算法性能严重下降,因此存在多径相干干扰的波束形成技术就成为一个亟需解决的问题。为克服信号相消现象,文献[3]提出对不相干干扰和多径相干信号共同进行抑制的自适应波束形成算法,但这种处理方法没有有效利用期望信号的多径信息,不能使阵列输出信干噪比达到最大,所以在很多情况下不可行。根据不同的应用情况,文献[4]提出3种基于不同处理准则的波束形成算法,但由于均基于迭代最大似然估计方法而提出,只能适用于等距线阵,因此适用范围有限。为充分利用多径相干信号信息,文献[5]提出一种基于累量的盲波束形成算法,这种算法能够有效地将期望信号和多径相干信号结合,提高阵列输出信干噪比,但是存在非相干干扰服从正态分布而期望信号为非正态分布的限制条件,因此适用范围也有限。利用多径相干信号的来波方向信息,文献[6-7]分别提出基于不确定集思想的波束形成算法,该类算法能够克服任意类型失配误差,但不足之处在于不确定集参数无法准确已知,只能通过经验来获得,而且针对大导向矢量失配误差,设定过大的不确定集会造成对非相干干扰信号的抑制能力下降。

本文利用期望信号的多路径来波方向,基于幅度响应约束的思想^[8],提出采用波束主瓣幅度响应约束的鲁棒自适应波束形成算法。该算法将多个有用信号的波束主瓣宽度拓宽,能够自由控制纹波水平,对大导向矢量失配误差具有鲁棒性,且在理论上不存在对阵形的限制,能够适用于更多阵形。

1 信号模型

以 M 阵元、等间隔的线性阵列为例,其窄带波束形成器的输出模型可表示为

$$y(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_M]^T$ 为自适应加权向量; $\mathbf{x}(k)$ 为 $M \times 1$ 维阵列接收数据矢量; $y(k)$ 为阵列输出, k 为采样时刻; $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示转置和共轭转置。

阵列接收数据矢量 $\mathbf{x}(k)$ 可表示为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}_e(k) + \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{n}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_e(k)$ 、 $\mathbf{x}_i(k)$ 、 $\mathbf{n}(k)$ 分别表示期望信号、干扰信号(与期望信号不相干)和高斯白噪声。

若接收数据中不包含多径相干信号,则 $\mathbf{x}_e(k)$ 代表单个期望信号,可表示为

$$\mathbf{x}_e(k) = s(k) \mathbf{a}_e \quad (3)$$

式中: $\mathbf{a}_e$ 为期望信号对应的导向矢量; $s(k)$ 为期望信号波形。

若接收数据中包含多径相干信号,则 $\mathbf{x}_e(k)$ 代表包含期望信号和多径相干信号的多个信号^[8],可表示为

$$\mathbf{x}_e(k) = \mathbf{a}(\theta_e) s(k) + \sum_{q=1}^Q \mathbf{a}(\theta_q) \rho_q \exp(j\varphi_q) s(k) \quad (4)$$

式中: θ_e 代表期望信号的来波方向; θ_q 代表期望信号第 q 个相干信号的来波方向; Q 为多径相干信号的个数; $\mathbf{a}(\theta_e)$ 表示期望信号的导向矢量; $\mathbf{a}(\theta_q)$ 、 ρ_q 和 φ_q 分别为多径相干信号的导向矢量、幅度响应衰减因子($\rho_q \leq 1$)和延迟相位。

令 $\mathbf{b} = \mathbf{a}(\theta_e) + \sum_{q=1}^Q \mathbf{a}(\theta_q) \rho_q \exp(j\varphi_q)$, 称 $\mathbf{b}$ 为多径合成导向矢量,则式(4)可简化为

$$\mathbf{x}_e(k) = \mathbf{b} s(k) \quad (5)$$

阵列输出信干噪比可表示为

$$R_{\text{SIN}} = \frac{P_e |\mathbf{w}^H \mathbf{b}|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{\text{in}} \mathbf{w}} \quad (6)$$

式中: P_e 为期望信号功率; $\mathbf{R}_{\text{in}}$ 为干扰加噪声协方差矩阵,可描述为

$$\mathbf{R}_{\text{in}} = E \left\{ \left(\sum_{q=1}^Q \mathbf{a}(\theta_q) s_q(k) + \mathbf{n}(k) \right) \left(\sum_{q=1}^Q \mathbf{a}(\theta_q) s_q(k) + \mathbf{n}(k) \right)^H \right\} \quad (7)$$

基于 MVDR 波束形成器的思想,最优权矢量可描述为^[7]

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}}{\mathbf{b}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为接收数据协方差矩阵。

2 采用幅度响应约束的鲁棒自适应波束形成算法

波束形成的前提在于需要已知信号的来波方向信息,而当接收数据中存在多径相干信号时,接收数据协方差矩阵会出现秩亏损现象,需要通过去相关的方法来估计有用信号的多路径来波方向。由于多路径方向信息的获取可能存在着一定的误差,因此,本文从该角度出发,通过拓宽波束主瓣来克服此类导向矢量失配误差带来的影响,只用已知多径相干信号的大致来波方向即可。

在实际应用中,由于有限的采样快拍数等误差因素,会造成采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 和真实协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 之间存在一定的失配误差 $\mathbf{\Delta}$ 。因此,为克服协方差矩阵存在的失配问题,参照文献[6]的方法对该失配进行如下操作

$$\mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}} + \mathbf{\Delta} \quad (9)$$

利用波束主瓣幅度响应约束技术^[6],以阵列输出功率最小化为目标函数,可将优化问题描述为

$$\begin{aligned} \min_w \max_{\mathbf{\Delta}} \quad & \mathbf{w}^H (\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{\Delta}) \mathbf{w} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \|\mathbf{\Delta}\| \leq \gamma \\ L \leq |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)| \leq U, \quad \theta \in A \\ A = [\theta_{L1}, \theta_{U1}] \cup [\theta_{L2}, \theta_{U2}] \cup [\theta_{L3}, \theta_{U3}] \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{\Delta}$ 为未知的共轭对称误差矩阵,其 Frobenius 范数 $\|\mathbf{\Delta}\| \leq \gamma (\gamma > 0$ 为固定常数); θ 为幅度响应约束的信号方向; $\mathbf{a}(\theta)$ 为 θ 对应的导向向量; U, L 分别为幅度响应约束的上下限; $[\theta_{L1}, \theta_{U1}]$ 、 $[\theta_{L2}, \theta_{U2}]$ 、 $[\theta_{L3}, \theta_{U3}]$ 为包含期望信号在内的多径相干信号的鲁棒响应区,并称 $\theta_U - \theta_L$ 为鲁棒响应区的波束宽度(各相干信号波束宽度一致),期望信号的真实方向 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和假设方向 $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3$ 分别被包含在 $[\theta_{L1}, \theta_{U1}]$ 、 $[\theta_{L2}, \theta_{U2}]$ 、 $[\theta_{L3}, \theta_{U3}]$ 内(干扰信号在鲁棒响应区外),如图1所示。

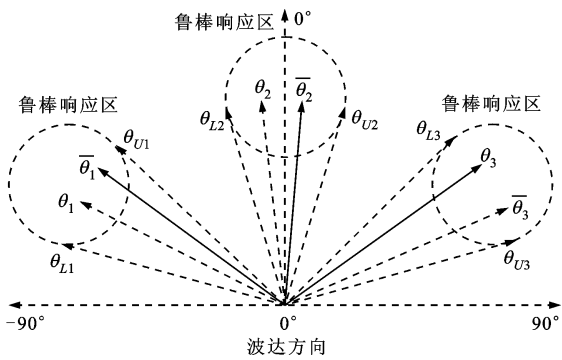


图1 主瓣幅度响应约束模型

通过分析可知,式(10)中存在下述优化问题

$$\max_{\mathbf{\Delta}} \mathbf{w}^H (\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{\Delta}) \mathbf{w}, \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{\Delta}\| \leq \gamma \quad (11)$$

通过求解优化问题获得最优解

$$\mathbf{\Delta} = \gamma \mathbf{w} \mathbf{w}^H / \|\mathbf{w}\|^2 \quad (12)$$

将该最优解代入式(11),则式(11)可简化为下述优化问题

$$\begin{aligned} \min_w \quad & \mathbf{w}^H (\hat{\mathbf{R}} + \gamma \mathbf{I}) \mathbf{w} \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} L \leq |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)| \leq U, \quad \theta \in A \\ A = [\theta_{L1}, \theta_{U1}] \cup [\theta_{L2}, \theta_{U2}] \cup [\theta_{L3}, \theta_{U3}] \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:令 $\gamma = \gamma_r \hat{\mathbf{R}}(1, 1)$, γ_r 为相对规则化因子, $\hat{\mathbf{R}}(1, 1)$ 指 $\hat{\mathbf{R}}$ 的第1行第1列元素^[9]。

上述优化问题式(13)的目标函数中,存在 $\hat{\mathbf{R}} + \gamma \mathbf{I} > 0$, 则 $\hat{\mathbf{R}} + \gamma \mathbf{I}$ 为正定矩阵,可以得出目标函数为凸函数;约束条件中, $|\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)| \leq U$ 是凸集合, $L \leq |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)|$ 是非凸的集合,如果能将式(13)中约束条件转化为凸约束,则该优化问题即可转化为凸优化问题,方便进一步求解。

文献[8]在对最优权矢量进行求解时,由于利用到谱分解的理论,只能适用于线阵,因此可通过相关转换来提高对更多阵形的适用性。本文通过转化,将上述优化问题转化为凸优化问题,过程如下。

首先,对式(13)中的约束条件重新进行描述

$$\begin{aligned} \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w} &\leq U^2, \quad \theta \in A \\ \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w} &\geq L^2, \quad \theta \in A \\ A &= [\theta_{L1}, \theta_{U1}] \cup [\theta_{L2}, \theta_{U2}] \cup [\theta_{L3}, \theta_{U3}] \end{aligned} \quad (14)$$

然后,利用本文所提引理可直接对权矢量进行分解求解,理论上不存在文献[6]中对阵形的限制问题。本文的引理1是对文献[10]中引理1作相关改进而得,具体描述如下。

引理1 对任意给定的 $\mathbf{a}(\theta) \in \mathbf{C}^M$ 和 L, M , 当且仅当存在 $\mathbf{w}_1 \in \mathbf{C}^M$ 和 $\mathbf{w}_2 \in \mathbf{C}^M$ 满足式(15)时,则存在 $\mathbf{w} \in \mathbf{C}^M$ 满足式(14),即

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2)^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2) &\leq U^2, \quad \theta \in A \\ 4\text{Re}\{\mathbf{w}_1^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w}_2\} &\geq L^2, \quad \theta \in A \\ A &= [\theta_{L1}, \theta_{U1}] \cup [\theta_{L2}, \theta_{U2}] \cup [\theta_{L3}, \theta_{U3}] \end{aligned} \quad (15)$$

如果式(15)存在可行解 $\mathbf{w}_1$ 和 $\mathbf{w}_2$, 则 $\mathbf{w} = \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2$ 即为式(14)的可行解。对本文引理1的证明可参考文献[10]中引理1的证明。

利用引理1,可将式(14)中的非凸约束条件 $\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w} \geq L^2$ 转化为 $4\text{Re}\{\mathbf{w}_1^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w}_2\} \geq L^2$, 则式(13)所示优化问题可重新描述为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_2} \quad & (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2)^H \mathbf{R} (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2)^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) (\mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_2) \leq U^2, \quad \theta \in A \\ 4\text{Re}\{\mathbf{w}_1^H \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w}_2\} \geq L^2, \quad \theta \in A \\ A = [\theta_{L1}, \theta_{U1}] \cup [\theta_{L2}, \theta_{U2}] \cup [\theta_{L3}, \theta_{U3}] \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

在上述优化问题中,将 $\mathbf{w}_1$ 固定, $\mathbf{w}_2$ 作为优化变量,目标函数为凸函数,约束条件中 $4\text{Re}\{\mathbf{w}_1^H \mathbf{a}(\theta) \cdot \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{w}_2\} \geq L^2$ 为凸约束,则式(13)所描述的优化问题就转化为式(16)所描述的二阶锥规划问题,即可通过凸优化相关理论求解获得 $\mathbf{w}_2$ ^[11], 而 $\mathbf{w}_2$ 的求解

需要对 w_1 进行初始赋值,对 w_1 的初始赋值可参考文献[9]中对初始值的赋值方法。

通过上述过程获得 w_2 后,需要对该权矢量的准确性进行检验。设定常数 δ 进行如下判定:①如果 $\|w_1 - w_2\| \leq \delta$ 或达到设定的迭代次数,则依据引理1获得优化问题(15)的最优解 $w = w_1 + w_2$;②如果 $\|w_1 - w_2\| > \delta$ 或未达到设定的迭代次数,令 $w = w_1 + w_2$,并通过 $w_1 = w/2$ 对 w_1 重新进行赋值,继续运用式(16)进行迭代运算,直至获得满足终止条件的 w_2 ,进而获得更为准确的波束形成权矢量 $w = w_1 + w_2$ 。

3 仿真结果与分析

仿真实验是将本文算法与文献[6]算法进行比较,为保证比较的公平性,尽量采用文献[6]的仿真条件。该仿真条件主要针对均匀线阵(Uniform Linear Array, ULA)的情况,因此此次实验主要针对均匀线阵进行仿真,但为了说明算法能适用于更多阵形,也在均匀圆阵(Uniform Circular Array, UCA)下做了部分仿真。实验采用20个全向阵元构成的ULA,阵元间距为半波长,假设期望信号和多径相干信号分别来自 -15° 、 10° 、 40° ,期望信号功率为10 dB,真实期望信号与多径相干信号在各自鲁棒响应区服从均匀分布并随机生成,多径相干信号幅度响应衰减因子 ρ_q 在线性区域 $[0, 1]$ 内随机生成,相位变化 φ_q 在区域 $[0, 2\pi]$ 内随机生成。与期望信号和多径相干信号不相干的4个干扰信号分别从 -55° 、 -35° 、 30° 和 60° 入射,功率均为30 dB。加载噪声为0均值、单位方差的空间高斯白噪声。鲁棒响应区内每隔 0.5° 取一个方位角生成优化模型的约束条件,相对规则化因子取 $\gamma_r = 0.1$,设定纹波水平 $r = 0.3$ dB, L 和 U 分别取^[9,12] $L = 10^{-r/20}$ 、 $U = 10^{r/20}$ 。采用10阵元、半径为 $5\lambda/2\pi$ 的水平UCA时,假设期望信号和多径相干信号的来波方向分别为 $(\theta_0, \phi_0) = (0^\circ, 80^\circ)$ 、 $(\theta_1, \phi_1) = (-80^\circ, 80^\circ)$ 、 $(\theta_2, \phi_2) = (80^\circ, 80^\circ)$ (其中 ϕ 为方位角, θ 为俯仰角)。鲁棒响应区方位和俯仰上的波束宽度均为 10° ,参照文献[12],在鲁棒响应区的方位和俯仰上,每隔 1° 取一个角度生成优化模型的约束条件。4个干扰信号方向分别为 $(-100^\circ, 78^\circ)$ 、 $(-55^\circ, 79^\circ)$ 、 $(55^\circ, 82^\circ)$ 、 $(105^\circ, 81^\circ)$ 。所有实验数据均经过200次快拍采样,实验结果均来自100次蒙特卡罗实验。

图2所示为本文算法随着迭代次数变化的仿真情况,波束宽度取为 10° 。

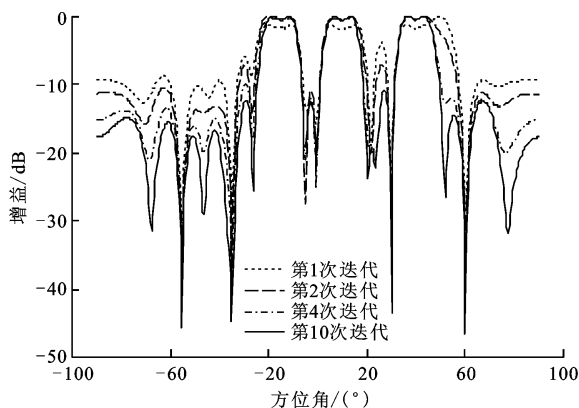


图2 不同迭代次数下的方向图

由图2可以看出,本文算法能够在期望信号和多径相干信号方向生成波束主瓣,而在非相干干扰信号方向生成较深零陷,达到抑制的目的。随着迭代次数的增加,波束主瓣越来越明显,旁瓣水平越来越低,一定程度上说明波束权矢量越来越优。第4次迭代和第10次迭代的方向图基本一致,则说明本文算法在经过4次迭代后基本收敛。为保证算法能够得到较优权矢量,在之后的实验中取迭代次数为10次。

图3、图4所示为波束宽度分别取 4° 、 6° 、 8° 、 10° 的整体方向图(方向图经过归一化处理)和局部放大图。实验采用接收数据协方差矩阵的理想值 R 。

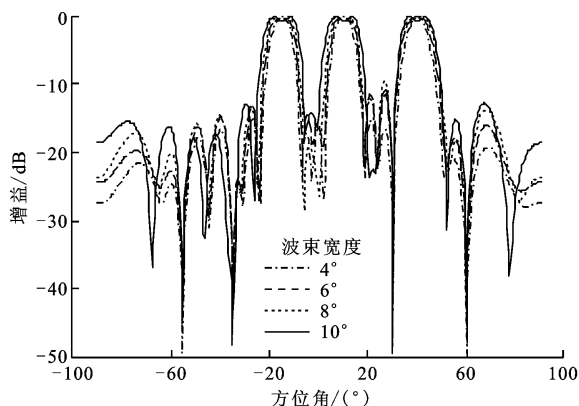


图3 ULA下不同波束宽度的整体方向图

从图3和图4可以看出本文算法能够精确控制鲁棒响应区的波束宽度,且能将纹波水平精确控制在区间 $[-0.6$ dB, 0 dB] 内。

图5和图6给出了本文算法在均匀圆阵下的方向图和局部放大图(由鲁棒响应区的不同俯仰角对应的切面图叠加而成,叠加的俯仰角范围为 $75^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$,方向图未进行归一化处理)。从图5、图6可以看出,在均匀圆阵的情况下,同样可以在期望信号和多径相干信号方向生成主瓣,并对非相干干扰信

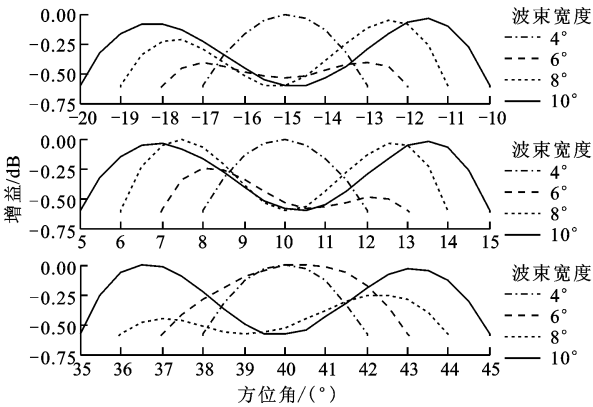


图 4 图 3 中不同方位角区间的局部放大大方向图

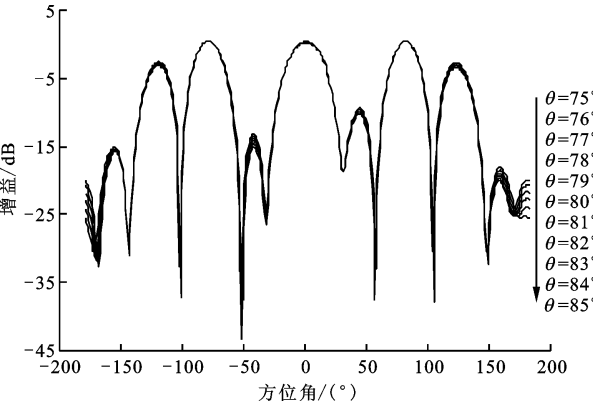


图 5 UCA 下的整体方向图

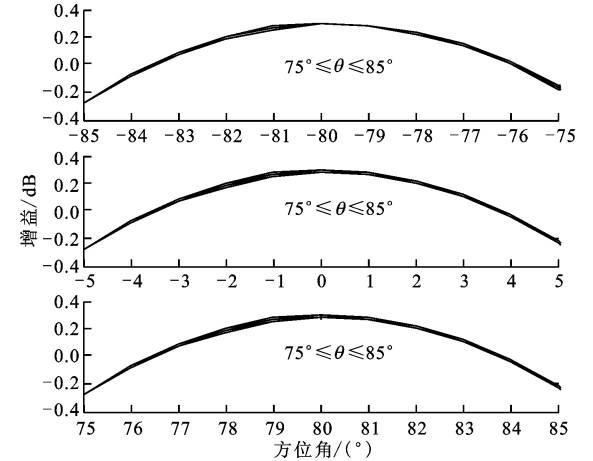


图 6 图 5 的局部放大大图

号进行抑制,本文算法同样适用于均匀圆阵。

图 7~图 10 为本文算法与文献[6]算法 1、2 中不确定集参数取不同值时的仿真比较图。由文献[6]可知,当波束宽度为 7° ,取 $\epsilon_1=1.8$ 、 $\epsilon_2=2.4$ 时算法 1、2 性能最优,而在一般情况下无法获得最优参数,一般将其设定为 $\epsilon_1=\epsilon_2=1.5$ 。实验采用采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$,图 7、图 9 中信噪比均取为 10 dB。

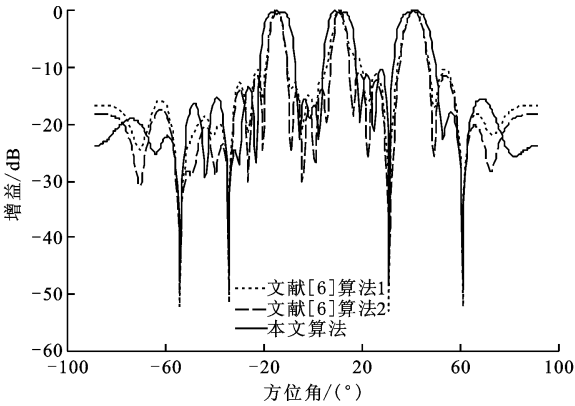


图 7 $\epsilon_1=1.8$ 、 $\epsilon_2=2.4$ 时 3 种算法的方向图比较

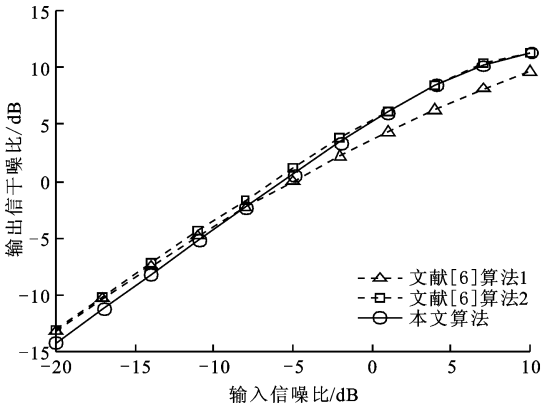


图 8 $\epsilon_1=1.8$ 、 $\epsilon_2=2.4$ 时 3 种算法的输出信干噪比较

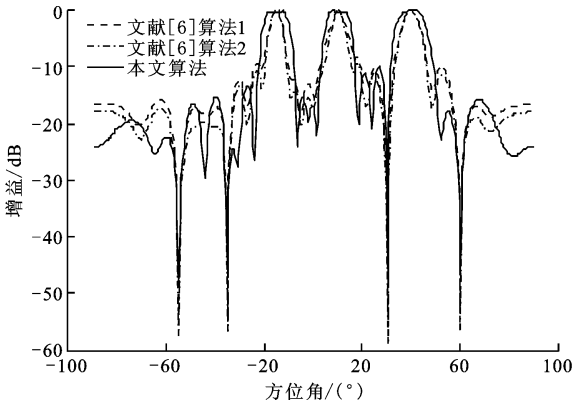


图 9 $\epsilon_1=\epsilon_2=1.5$ 时方向图的比较

由图 7 可见,本文算法能够有效抑制干扰,并生成宽于文献[6]算法 1、2 的波束主瓣,保证了信号出现大方向偏差时仍然能够被有效接收,因此提高了对大方向失配误差的鲁棒性。如图 8 所示,本文算法在实验所取 SNR 范围内,输出信干噪比介于文献[6]算法 1 和算法 2 之间(低信噪比时相差在 2 dB 以内),但随着信噪比变大,本文算法性能逐渐优于文献[6]算法 2,并趋近于文献[6]算法 1。

在现实环境中,由于各种误差因素的存在,往往难以取到最佳不确定集的参数值,如文献[6]所述。

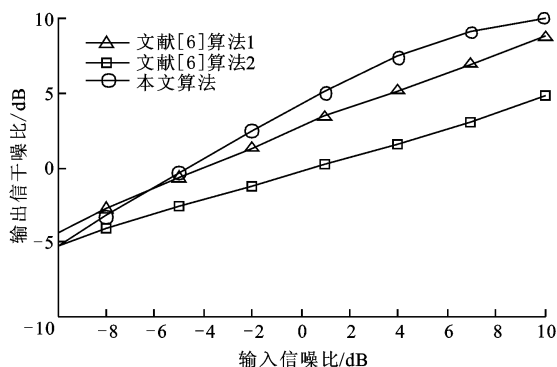


图 10 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1.5$ 时 3 种算法的输出信干噪比比较

若选取 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1.5$, 则仿真结果如图 9、图 10 所示。将图 9 与图 7 的方向图比较, 区别不明显, 但将图 10 与具有最优参数的图 8 比较, 可以发现, 在图 10 中由于参数选取未达到最优, 因此文献[6]算法 1、2 的性能必然会出现下降, 这是由于此时选取的不确定集已无法对真实的导向矢量进行有效约束, 而这体现了基于不确定集算法的不足之处。与文献[6]算法相比, 本文算法输出信干噪比随信噪比的增加而增加, 且在较高信噪比时, 性能明显优于文献[6]算法 1、2。

4 总 结

为了提高自适应波束形成算法的鲁棒性, 提出采用幅度响应约束的鲁棒自适应波束形成算法。本文算法基于期望信号的多路径来波方向信息, 利用波束主瓣幅度响应约束技术拓宽波束主瓣, 提高了波束形成器对大导向矢量失配误差的鲁棒性。仿真结果表明, 本文算法能够在期望信号的多路径方向形成多波束, 抑制干扰和噪声, 并有效控制波束主瓣宽度和纹波水平, 理论上适用于更多阵形。

参考文献:

- [1] WIDROW B, DUVAL K, GOOCH R, et al. Signal cancellation phenomena in adaptive antennas: causes and cures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 469-478.
- [2] 黄中瑞, 刘春生, 唐孝国. 基于二阶锥规划的相干信号自适应波束形成 [J]. 电子信息对抗技术, 2013, 28(2): 10-14.
HUANG Zhongrui, LIU Chunsheng, TANG Xiaoguo. Adaptive beam-forming of coherent signals based on second-order cone programming [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2013, 28(2): 10-14.

- [3] LEE T S, LIN T T. Coherent interference suppression with complementally transformed adaptive beamformer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(5): 609-617.
- [4] BRESLER Y, REDDY V U, KAILATH T. Optimum beamforming for coherent signal and interferences [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1988, 36(6): 833-843.
- [5] DOGAN M C, MENDEL J M. Cumulant-based blind optimum beamforming [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 722-741.
- [6] YU Lei, LIU Wei, RICHARD J L. Robust beamforming methods for multipath signal reception [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(2): 379-390.
- [7] VOROBYOV S A, GERSHMAN A B, LUO Zhiqian. 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.
- [8] YU Zhuliang, SER W, ER M H, et al. Robust adaptive beamformers based on worst-case optimization and constraints on magnitude response [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7): 2615-2628.
- [9] LIAO Bin, TSUI K M, CHAN S C. Robust beamforming with magnitude response constraints using iterative second-order cone programming [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3477-3482.
- [10] WANG Fan, BALAKRISHNAN V, ZHOU P Y, et al. Optimal array pattern synthesis using semidefinite programming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(5): 1172-1183.
- [11] GRANT M, BOYD S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 1.21 [EB/OL]. [2013-04-05]. <http://cvxr.com/cvx/doc/CVX.pdf>.
- [12] 金伟, 贾维敏, 姚敏立, 等. 一种分解迭代二阶锥规划鲁棒自适应波束形成算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2051-2057.
JIN Wei, JIA Weimin, YAO Minli, et al. A robust adaptive beamforming algorithm using decomposition and iterative second-order cone programming [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(9): 2051-2057.

(编辑 刘杨)