

基于幅度响应约束的稳健自适应宽带波束形成

陈明建, 罗景青

(解放军电子工程学院电子对抗信息处理实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:针对信号方向失配会导致自适应波束形成算法的性能急剧下降这一问题, 提出一种基于幅度响应约束的稳健自适应宽带波束形成方法。通过对阵列波束指向附近范围内的波束幅度响应施加约束来克服对信号方向失配的敏感性, 并结合频率不变技术, 使阵列波束图在主瓣区域内波束图近似保持频率不变特性, 然后采用参考频率上幅度响应约束的优化方法来确定最优权值。仿真结果表明: 与基于最差情况性能最优的稳健方法相比, 该方法复杂度低, 能灵活控制稳健的方位区域宽度和幅度响应抖动值, 且不仅能有效地控制波束主瓣区域内信号的畸变, 还改善了阵列输出的信干噪比, 使其更接近最优值。

关键词:稳健自适应波束形成; 宽带; 波束指向误差; 幅度响应约束; 空间响应偏差

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-1194(2011)05-0034-07

Robust Adaptive Broadband Beamforming Based on Constraints Magnitude Response

CHEN Mingjian, LUO Jingqing

(Electronic Engineering Institute, laboratory of electronic countermeasure and information processing, Hefei 230037, China)

Abstract: The performance of adaptive beamforming algorithms is known to undergo substantial degradation in the presence of even slight steering direction error. To account for mismatches, a novel robust adaptive broadband beamforming algorithm based on constraints magnitude response (CMR) was proposed. An array magnitude response constraint over the region around the array steering direction was used to increase the robustness of the optimal beamforming against steering direction mismatch. Combined with the frequency invariant technique, the array beam pattern kept approximately the same amplitude response to the wideband incident signal at different frequencies. The weight vector was optimized to involve minimization of a quadratic function subject to constraint on magnitude response at the reference frequency. Simulation results demonstrated that, compared with the worst-case optimization method, the algorithm had low complexity and was able to flexibly control the robust response region with specified beamwidth and response ripple. Furthermore, the proposed beam former could obtain the prescribed robustness against steering vector errors, suffered the least distortion from the directions near the steering angle, improved the output array signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) performance, and made SINR consistently close to the optimal one.

Key words: robust adaptive beamforming; broadband; steering direction error; magnitude response constraint; spatial response variation

0 引言

自适应波束形成能增强期望信号并抑制干扰和

噪声, 已被广泛应用于雷达、声纳、语音处理和通信系统等领域^[1-3]。当期望信号来波方向无误差时, 传统自适应波束形成算法可以根据信号环境的变化,

* 收稿日期: 2011-05-28 修回日期: 2011-09-12

作者简介: 陈明建(1983-), 男, 湖南常德人, 博士研究生, 研究方向: 雷达信号处理、阵列信号处理及智能信号处理。E-mail: cdmj@126.com。

来自适应调整各阵元的加权因子,达到增强信号同时抑制干扰的目的^[4-5]。但在期望信号来波方向存在偏差时,算法的性能会急剧下降,尤其在高信噪比时,有用信号会被当作干扰而受到抑制。如何提高自适应波束形成算法对波束指向偏差的稳健性一直是人们研究的热点问题。

目前存在多种有效的方法用来克服信号观察方向失配问题,最具有代表性的方法如:线性约束最小方差(LCMV)波束形成算法通过增加多个方向约束^[6]和导数约束^[7-8],可减小算法对信号方向失配的敏感度,但同时要损失阵列的自由度。特征向量法采用信号子空间的信息估计权重向量,但是在低信噪比(SNR)条件下以及信号加干扰子空间的维数比较高时将会受到严重的制约和限制^[9-10]。基于对角加载的波束形成算法是一种简单有效的方法^[11-12],但是加载量的确定一直是一个比较困难的问题。基于二次型不等式约束的稳健算法在本质上是属于可变电角加载的范畴,通过对权重向量所形成的空间指向性函数在阵列指向角附近小区域内的加权平方误差进行约束来提高阵列的稳健性^[13-15]。

最近几年提出了基于模约束和不确定集约束的最差情况性能最优稳健算法^[16-17],该类算法的权矢量具有扩展对角加载的形式,根据导向矢量不确定集合可以确定最优加载量。基于波束响应幅度约束稳健算法在窄带情况下是一种简单有效方法^[18],对于宽带信号,该算法将增加许多的约束条件,不仅占用了系统的自由度,还增加了系统的复杂性。

针对以上问题,本文提出了一种基于幅度响应约束的稳健自适应宽带波束形成算法。

1 阵列模型与 LCMV 波束形成器

1.1 阵列模型

考虑 D 个宽带远场平面波入射到 M 元各向同性的均匀线阵上,阵元间距 d 为信号最高频率对于半波长,其中期望信号的波达方向为 θ_0 ,其余 $D-1$ 个宽带信号为干扰源,其波达方向分别为 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{D-1}\}$,以阵列的第 0 号阵元为参考阵元,每个阵元后有一个 J 阶 FIR 滤波器,每个节拍后的时延为 T_s , T_s 为时间采样周期。阵列结构如图 1 所示。

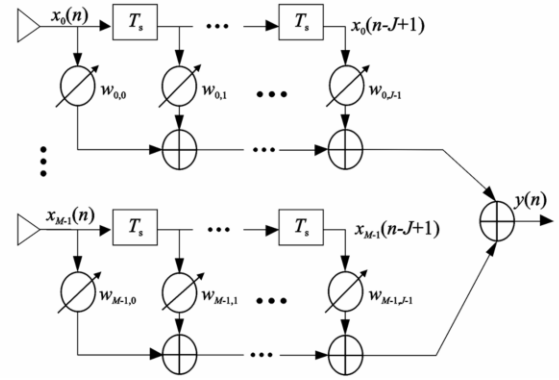


图 1 宽带波束形成器

Fig. 1 Broadband beamformer

第 m 号阵元接收到的信号为:

$$x_m(t) = s_0(t - \tau_m(\theta_0)) + \sum_{i=1}^{D-1} s_i(t - \tau_m(\theta_i)) + n_m(t) \quad (1)$$

式(1)中, $s_0(t), s_1(t), \dots, s_{D-1}(t)$ 为期望信号与干扰信号在参考阵元上的实包络信号波形; $\tau_m(\theta_0), \tau_m(\theta_1), \dots, \tau_m(\theta_{D-1})$ 为对应信源传播到第 m 号阵元相对于参考阵元的传播时延; $n_m(t)$ 为第 m 号阵元上零均值高斯白噪声。若第 m 号阵元的样本数据记为 $x_m(n) = x_m(t)|_{t=nT_s}$, 则该阵元其他各节拍数据为 $x_m(n - (k-1)) = x_m(t - (k-1)T_s)|_{t=nT_s}, k = 1, 2, \dots, J$ 。假设 $w_{m,k}$ 是对应于第 m 号阵元第 k 个节拍的实权值, 则波束输出信号时间序列可表示为:

$$y(n) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

式(2)中, $MJ \times 1$ 维权向量 \mathbf{w} 如下式所示

$$\mathbf{w} = [\omega_{0,0}, \dots, \omega_{M-1,0}, \dots, \omega_{0,J-1}, \dots, \omega_{M-1,J-1}]^T, (\cdot)^T \text{ 为转置操作。} \mathbf{x}(n) \text{ 为第 } n \text{ 个快拍数据, } \mathbf{x}(n) = [x_0(n), \dots, x_{M-1}(n), \dots, x_0(n-J+1), \dots, x_{M-1}(n-J+1)]^T。$$

1.2 LCMV 波束形成器

线性约束最小方差(LCMV)算法是通过约束期望方向或干扰方向的响应并最小化阵列输出功率,以获得良好的干扰抑制性能,其等价如下约束优化问题:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^T \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{C}^T \mathbf{w} = \mathbf{g} \quad (3)$$

式(3)中, \mathbf{R}_x 为协方差矩阵, \mathbf{C} 为约束矩阵,可约束单个或多个方向,即由期望或干扰方向的导向矢量组成, \mathbf{g} 为相应的约束值矢量。其最优解为:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{g} \quad (4)$$

当期望信号的波达方向精确已知时,信号导向矢量无偏差,LCMV 波束形成器能够提供无畸变的期望信号输出,同时能够最大程度地抑制干扰和噪

声。但在期望信号波达方向估计不准确时,导向矢量将出现偏差,波束输出的性能会急剧下降。尤其在高信噪比时,有用信号会被当作干扰而受到抑制,造成信号相消问题,导致输出 SINR 值下降。

2 幅度响应约束和 SRV 约束的稳健宽带波束形成方法

该算法首先通过对阵列波束指向附近范围内的宽频段阵列响应与参考频率对应方位的阵列响应误差模值进行约束,使阵列波束图在主瓣区域内的信号畸变最小,其波束图近似保持频率不变特性,然后利用窄带波束响应幅度约束的稳健算法,在参考频率上对阵列波束指向附近范围内的波束响应幅度施加约束,同时增加对权矢量的范数约束,来克服信号方向失配的影响,提高自适应算法的稳健性,并以损失较少阵列自由度来改善波束输出性能。

2.1 幅度响应约束的稳健方法

首先考虑窄带情况,考虑阵列与目标源位于同一平面的情况,基阵对信号方向为 θ 的波束响应为 $P(\theta) = \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta)$,波束的幅度响应约束可以表示为:

$$\sigma_L \leq |\mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta)| \leq \sigma_H, \theta \in [\theta_l, \theta_u] \quad (5)$$

式(5)中, $[\sigma_L, \sigma_H]$ 为稳健方位区域 $[\theta_l, \theta_u]$ 上波束的幅度响应抖动范围, $\mathbf{a}(\theta)$ 为窄带阵列的导向矢量。幅度响应约束的权矢量优化的准则是在满足一定方位区域的幅度响应约束条件下,同时使阵列输出功率最小,即 \mathbf{w} 为下面优化问题的解:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^T \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s. t. } \sigma_L \leq |\mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta)| \leq \sigma_H, \quad \theta \in [\theta_l, \theta_u] \quad (6)$$

式(6)可以通过凸优化法求解权矢量。图2为窄带基于幅度响应约束的稳健波束形成的波束图。

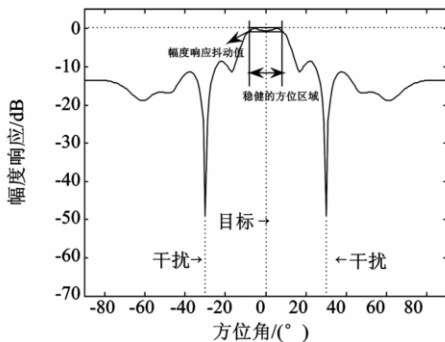


图2 窄带幅度响应约束的波束图

Fig. 2 Narrowband beam-pattern with amplitude response constraints

基于上述讨论,可将窄带幅度响应约束思想推广到宽带情况,假定宽带信源的频段范围为 $\Omega = [f_l, f_u]$,则波束响应幅度约束宽带稳健方法可表示为式(7)的约束优化问题:

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^T \mathbf{R}_x \mathbf{w} \quad \text{s. t. } \sigma_L \leq |\mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta, f)| \leq \sigma_H \quad \forall f \in [f_l, f_u], \forall \theta \in [\theta_l, \theta_u] \quad (7)$$

式中, $\mathbf{a}(\theta, f)$ 为宽带阵列的空时二维导向矢量,其表达式为 $\mathbf{a}(\theta, f) = \mathbf{a}_{T_s}(f) \otimes \mathbf{a}_\tau(\theta, f)$, $\mathbf{a}_{T_s}(f) = [1, e^{-j\omega_t}, \dots, e^{-j(J-1)\omega_t}]^T$, $\mathbf{a}_\tau(\theta, f) = [1, e^{-j\omega_s}, \dots, e^{-j(M-1)\omega_s}]^T$, $\omega_t = 2\pi f T_s$ 为时间归一化频率, $\omega_s = 2\pi f \tau$ 为空间归一化频率, $\tau = d \sin \theta / c$, c 为光速;符号 \otimes 表示 Kronecker 积。

假设把宽带信源频段分为 K 个子带,并用 f_k 表示为第 k 个子带的中心频率,即用 K 离散化的频率 $f_k \in \Omega, k = 1, 2, \dots, K$ 来近似表示频率集合 Ω 。若直接运用窄带稳健算法,分别使 K 个子带的波束响应幅度约束,即满足式(7)的约束条件可实现宽带稳健算法。但上述基于子带划分的优化问题有 $2K$ 个约束条件,当信号带宽较宽,即子带划分个数 K 较大时,过多的约束将损失阵列的自由度,降低阵列输出 SINR 性能,且还会增加算法的复杂性和计算量。

2.2 本文方法

为了解决上述问题,本文提出了通过约束空间响应偏差,并利用频率不变技术结合窄带波束响应幅度约束的稳健算法,解决传统子带划分的宽带稳健算法中,过多约束条件而损失阵列自由度,导致波束输出的 SINR 性能下降的问题,同时减少了信号失真和优化算法的计算量和复杂度。

定义阵列空间响应偏差 (Spatial Response Variation) SRV 为在主瓣区域内 (可设置为期望信号的波达方向偏差范围), 频率范围 Ω 上的阵列响应与在某参考频率 f_r 的阵列响应的误差模平方,即:

$$\text{SRV} = \frac{1}{B} \int_{\Omega} \int_{\Theta_{\text{ML}}} |\mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta, f) - \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta, f_r)|^2 df d\theta = \mathbf{w}^T \mathbf{Q} \mathbf{w} \quad (8)$$

式中, $B = f_u - f_l$, 表示宽带信源的带宽, $\Theta_{\text{ML}} = [\theta_l, \theta_u]$ 为期望信号的波达方向偏差范围, \mathbf{Q} 为 Hermitian 对称矩阵,

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{B} \int_{\Omega} \int_{\Theta_{\text{ML}}} \text{Re} \{ (\mathbf{a}(\theta, f) - \mathbf{a}(\theta, f_r)) (\mathbf{a}(\theta, f) - \mathbf{a}(\theta, f_r))^H \} df d\theta \quad (9)$$

$\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部操作。

通过对式(8)分析可知,当 SRV 为零时,该波束

器即满足频率不变特性,信号能够无失真输出,因此为了解决传统基于子带划分宽带稳健算法中,过多约束条件而导致波束输出 SINR 性能下降的问题,并尽可能的减少信号失真,可以通过控制主瓣区域的 SRV 值,使阵列波束图在宽频段内有近似恒定的主瓣响应,然后对参考频率 f_r 处的波束幅度响应施加约束,并对权向量的范数进行约束,式(7)可以改写为如下约束优化问题:

$$\min_w w^T R_x w \quad \text{s. t.} \quad w^T Q w \leq \epsilon, \|w\| \leq \delta$$

$$\sigma_L \leq |w^T a(\theta, f_r)| \leq \sigma_H, \theta \in \Theta_{ML} \quad (10)$$

式中, ϵ 为非负实数,表示空间响应偏差的上限, δ 为正实数,为加权矢量范数的上限。

由于式(10)中第三个约束条件的左边不等式为半无穷非凸问题,难以求解,因此可以将非凸问题近似转化为凸优化问题,即:

$$\operatorname{Re}(w^T a(\theta, f_r)) \geq \sqrt{\sigma_L} \quad (11)$$

对矩阵 R_x 进行 Cholesky 分解,即 $R_x = U_0^T U_0$, 则得到

$$w^T R_x w = w^T U_0^T U_0 w = \|U_0 w\|^2 \quad (12)$$

同理可得 $w^T Q w = \|U_1 w\|^2$ 。注意到使 $\|U_0 w\|^2$ 最小化等价于使 $\|U_0 w\|$ 最小化,引入一个非负标量 β , 并对方位区域离散化,式(10)可转化为如下凸优化问题:

$$\min_w \beta \quad \text{s. t.} \quad \|U_0 w\| \leq \beta, \|U_1 w\| \leq \epsilon, \|w\| \leq \delta$$

$$\operatorname{Re}(w^T a(\theta, f_r)) \geq \sqrt{\sigma_L}, |w^T a(\theta_i, f_r)| \leq \sigma_H, \theta_i \in \Theta_{ML} \quad (13)$$

式中, $\Theta_{ML}(\theta_0) = \{\theta_i \mid |\theta_i - \theta_0| \leq \Delta\theta\}$, $\Delta\theta$ 为期望信号波达方向的最大偏差, $\theta_i (i = 1, 2, \dots, P)$ 表示主瓣区域的离散化的 P 个方向。从上式可以看出,当 $K \gg 2$ 时,相比式(7)不仅很大程度上减少了算法的计算量,而且约束条件的减少能提供更多的阵列自由度抗干扰,提高阵列输出的 SINR 性能。注意到式(13)权值的凸优化求解可以借助于高效的 SeDuMi 工具箱求解权向量^[19]。

3 计算机仿真

为了验证本文方法的有效性,分别采用以阵列输出信干噪比 SINR、归一化信号失真 NSD,以及归一化均方误差 NMSE 来衡量波束形成器的性能。

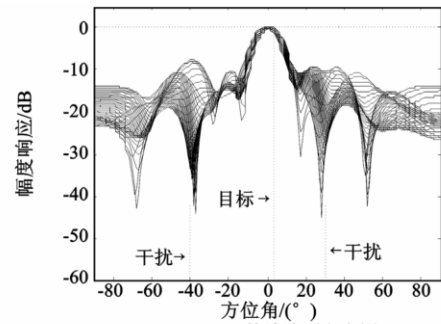
以下仿真实验若无特殊说明,均在各向同性的 8 元均匀线阵模型下完成,阵元间距为信号最高频率对应的半波长。空间存在一个期望目标信号和两个不相关的干扰信号,假设期望目标信号的入射方向为 0° ,而实际波达方向为 3° ,即存在 3° 的波束指向误差;干扰信号方位角分别为 -40° 和 30° ,功率均为 30 dB。假定宽带信号的归一化工作频段 $[f_L, f_U] = [0.37, 0.5]$,参考频率 $f_r = 0.45$,每个阵元后节拍阶数 $J = 18$ 。此外,各通道噪声为不相关高斯白噪声,功率 0 dB。其他参数设置如下:权矢量范数的上限 $\delta = 0.6$,主瓣区域的空间响应偏差上限分别为 $\epsilon = 10^{-5}$,幅度响应约束的上限、下限值分别为 $\sigma_H = 10^{r_{dB}/20}$ 、 $\sigma_L = 10^{-r_{dB}/20}$, r_{dB} 为幅度响应抖动值,单位为 dB。所有统计实验结果均由 100 次 Monte-Carlo 实验平均得到。

为方便讨论,将文献[18]中最坏情况下性能优化稳健自适应波束形成方法记为 RB-WC 算法,而本文所提基于幅度响应约束的稳健波束形成方法记为 RB-CMR 算法。

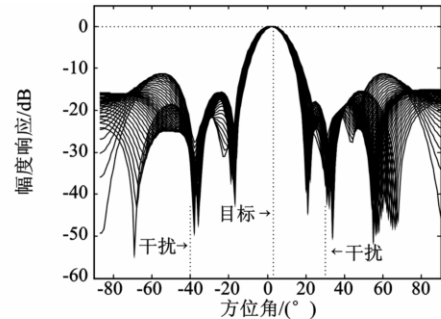
3.1 实验 1

考察 3 种算法阵列方向图情况。

设输入信噪比 $\text{SNR} = 0$ dB,干噪比 $\text{JNR} = 30$ dB, $r_{dB} = 0.3$ dB。图 3(a)、图 3(b)和图 3(c) 分别给出了信号方向存在偏差时 3 种算法的阵列方向图。



(a) LCMV 算法阵列方向图



(b) RB-WC 算法阵列方向图

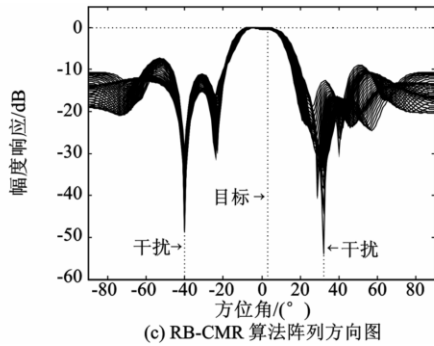


图3 三种算法阵列方向图

Fig. 3 Array patterns of three algorithm

从图3中可以看出,LCMV算法在真实期望信号波达方向处波束指向出现偏差,且最大零陷位置偏离了干扰目标方向,其性能最差;RB-WC算法对系统的稳健性能有所改善,但无法控制稳健的方位区域宽度,而且干扰零陷位置也有所偏移;而本文所提的算法在信号方向存在偏差的情况下,波束增益最大方向与信号真实方向的偏差较小,且有一定的稳健的方位区域宽度,零陷位置准确对准干扰方向,有助于提高阵列的 SINR 性能。

3.2 实验2

考察本文算法在不同稳健参数情况下的波束图。

仿真条件不变,本文算法在不同稳健参数情况下的波束图如图4所示,该法可灵活控制稳健的方位区域宽度和相对应方位范围的波束幅度响应的抖动值。

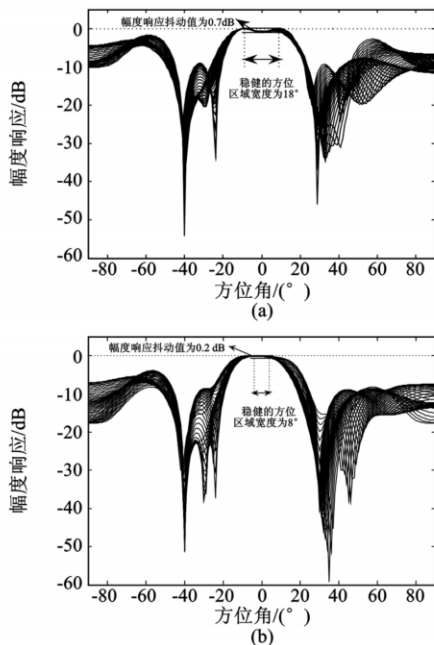


图4 不同稳健参数时的波束图

Fig. 4 Beam-pattern with different robust parameters

3.3 实验3

考察不同采样快拍数与输入 SNR 情况下的波束输出 SINR 性能。

3种算法波束输出 SINR 与采样快拍数 N 的关系如图5所示,其中 $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ 。图中3条曲线均随着快拍数 N 的增加迅速收敛并趋于平稳,其中常规的 LCMV 算法由于不具有稳健性能,收敛后的 SINR 值最小,而两种稳健算法的 SINR 性能较前者有较大改善,且本文算法优势更明显。这是由于通过增加空间响应偏差约束,减少约束优化模型的约束不等式个数,因此本文方法将有更多的阵列自由度用于改善 SINR 性能。

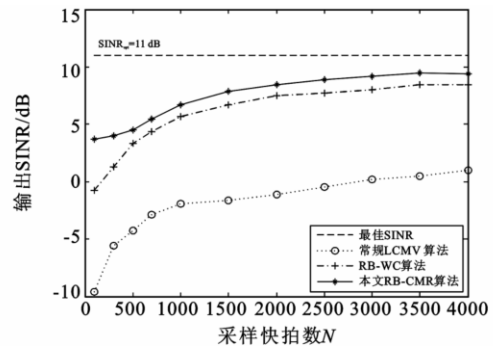


图5 输出 SINR 与采样快拍数的关系

Fig. 5 The relationship between output SINR and the number of sample snapshots

图6为3种算法波束输出 SINR 与输入 SNR 的关系曲线。由图6可知,本文算法波束输出的 SINR 性能要优于常规 LCMV 算法和 RB-WC 算法,尤其在高 SNR 时,这种优势更加明显。这是因为本文算法在提高阵列稳健性的同时,减少了优化模型的约束条件个数,从而有更多阵列自由度用于改善波束输出的 SINR 性能。

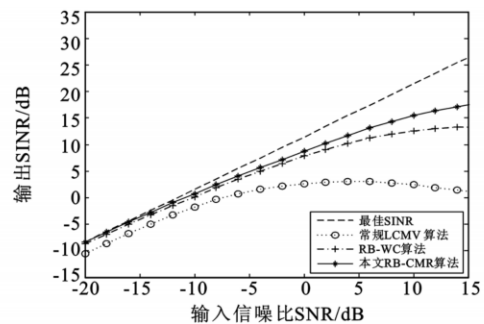


图6 输出 SINR 与输入 SNR 的关系

Fig. 6 The relationship between output SINR and input SNR

3.4 实验 4

考察在不同输入 SNR 情况下,波束输出期望信号失真 NSD 与归一化均方误差 NMSE 性能。

图 7 是阵列波束输出的归一化信号失真 NSD 随信噪比 SNR 的变化曲线。由图 7 可知,在信号方向存在偏差时,常规的 LCMV 波束输出信号有较大信号失真,随着输入 SNR 的增加,波束输出信号失真更严重,而两种稳健算法的 NSD 值对输入 SNR 不敏感,具有较强的稳健性,但由于本文算法增加了频率不变约束,其 NSD 值更小,降低波束形成对信号失真的影响。

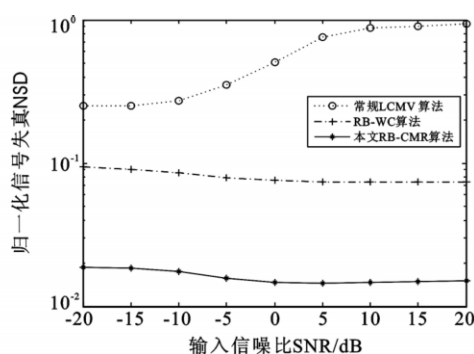


图 7 归一化信号失真 NSD 与输入 SNR 的关系

Fig. 7 The relationship between NSD and input SNR

图 8 为波束输出归一化均方误差 NMSE 随信噪比 SNR 变化曲线。由图 8 可知,与常规 LCMV 算法和 RB-WC 算法相比,本文算法的 NMSE 性能均优于上述两种算法,在输入 SNR > 15 dB 时,其 NMSE 几乎为零,由此可见,本文算法对信号方向误差有更强的稳健性,波束输出的总体性能最佳。

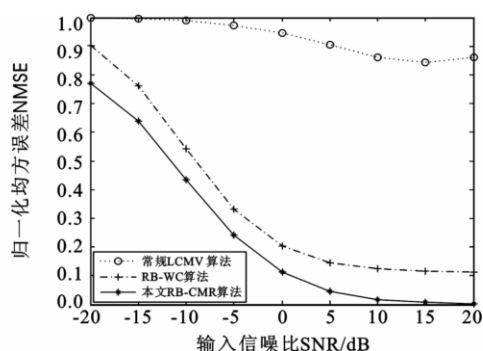


图 8 归一化均方误差 NMSE 与输入 SNR 的关系

Fig. 8 The relationship between NMSE and input SNR

4 结论

本文考虑期望信号方向存在偏差时,常规自适应波束形成算法的性能将会急剧下降的问题,提出了一种基于幅度响应约束的稳健自适应宽带波束形成方法。该方法通过对阵列波束指向附近范围内的波束幅度响应施加约束来提高阵列的稳健性,并增加阵列空间响应偏差约束与权重向量的范数约束,减少了约束优化不等式的个数,进一步提高该方法的波束输出 SINR 性能和稳健性,降低算法的计算量。计算机仿真结果表明:与稳健的 RB-WC 方法相比,本文方法对信号方向存在偏差有更强的稳健性,且能有效控制波束稳健区域宽度和幅度响应的抖动值,更加有效地抑制干扰信号,使阵列波束输出性能均优于稳健的 RB-WC 方法。

参考文献:

- [1] Van Trees H L. Optimum Array Processing, part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John & Sons, Inc. Wiley, 2002.
- [2] Liu W, Weiss S. Wideband Beamforming: Concepts and Techniques[M]. U. K: Chichester, Wiley, 2010.
- [3] Do-hong T, Russer P. Signal processing for wideband smart antenna array application[J]. IEEE Microw Mag, 2004(1): 57-67.
- [4] Lin N, Liu W, R J Langley. Performance analysis of an adaptive broadband beamformer based on a two-element linear array with sensor delay-line processing[J]. Signal Processing, 2010, 90: 269-281.
- [5] Yu L, Lin N, Liu W, et al. Bandwidth performance of linearly constrained minimum variance beamformer[J]. IEEE international workshop on antenna technology, 2007: 327-330.
- [6] Frost III O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. Proceeding of IEEE, 1972, 60 (8): 926-935.
- [7] Buckley K M, Yeh C C. Performance analysis of derivate constraint adaptive arrays with pointing errors[J]. , IEEE Trans. Antenna Propag, 1992, 40: 975-981.
- [8] Zhang S, Thng I L J. Rubost prestreering derivative constraints for broadband antenna arrays[J]. IEEE Trans Signal Processing 2002, 50: 1-10.
- [9] Feldman D D, Griffiths L J. A projection approach to robust adaptive beamforming [J]. IEEE Trans on Signal

- Processing, 1994, 42(4): 867-876.
- [10] 赵永波, 张守宏. 基于特征空间的线性约束最小方差波束形成器[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(3): 423-426.
ZHAO Yongbo, ZHANG Shouhong. Eigenspace-Based Linearly Constrained Minimum Variance Beamformer[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(3): 423-426.
- [11] Carlson B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays [J]. IEEE Trans. on Aerosp Electron Syst, 1988, 24(7): 397-401.
- [12] Van Veen B D. Minimum variance beamforming with soft response constraints[J]. IEEE Trans Signal on Processing, 1991, 39(9): 1 964-1 972.
- [13] Duan H P, Boon P N, M S S Chong, et al. Applications of the SRV constraint in broadband pattern synthesis[J]. Signal Processing, 2008, 88: 1 035-1 045.
- [14] 宋昕, 汪晋宽, 韩英华. 基于二次型约束的鲁棒自适应波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2 662-2 665.
SONG Xin, WANG Jinkuan, HAN Yinghua. Robust Adaptive Beamforming Algorithm with a Quadratic Constraint[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(11): 2 662-2 665.
- [15] Boon Poh Ng and Huiping Duan. Designing amplitude/phase response of the frost beamformer[J]. IEEE Trans. on Signal Processing. 2007, 55(5): 1944-1949.
- [16] Vorobyov S A, Gershman AB, Luo Z-Q. Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 2003, 51: 313-324.
- [17] Rubsamen M, Gershman A B. Robust presteered broadband beamforming based on worst-case performance optimization[C]//IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Signal Processing. Darmstadt; IEEE, 2008: 340-344.
- [18] Yu Z L, Ser W, Er M H, Gu Z H, Li Y Q. Robust adaptive beamformers based on worst-case optimization and constraints on magnitude response[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57: 2 615-2 628.
- [19] Sturm J K. Using SeDuMi 1. 02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric, Optimiz [J]. Meth, Software, 1999, (11-12): 625-653.

(上接第 33 页)

的相位差从而使得天线阵列波束指向不同的方向。实验结果表明:该馈电网络在工作频段内各输出端口等功率输出,输出端相位差与理论分析一致。所以经过进一步改进和优化后,该馈电网络可以被应用于无线电引信探测系统的多波束阵列天线中,实现对目标的精确探测。

参考文献:

- [1] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 高雪, 胡鸿飞. 四波束切换天线的分析与设计[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1 372-1 374.
GAO Xue, HU Hongfei. Analysis and design of a four-beam-switched antenna [J]. ACTA Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1 372-1 374.
- [3] 杨煜, 冯正和. 用改进的 Butler 矩阵实现固定多波束面天线阵[J]. 微波学报, 2000, 16(3): 237-241.
YANG Yu, FENG Zhenghe. A multibeam planar array realized by modified butler matrix[J]. Journal of Microwaves, 2000, 16(3): 237-241.
- [4] 波扎 (pozar, D. M). 微波工程[M]. 张肇仪译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 文瑞虎, 王海彬, 李元光. 基于基片集成波导的 K 波段定向耦合器[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(1): 41-45.
WEN Ruihu, WANG Haibin, LI Yuanguang. K-Band Substrate Integrated Waveguide Directional Couplers[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(1): 41-45.
- [6] Deslandes D, Wu K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form[J]. IEEE Microwave and Guide Wave Letters, 2001, 11(2): 68-70.
- [7] Deslandes D, Wu K. Intergrated Trasit on of coplanar to Retangular Waveguide[J]. IEEE MTT Symposium digest, 2001(2): 619-622.
- [8] 纪瑞珠, 潘晓建. 基于 S 波段的一种微带小天线的仿真计算[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(1): 61-63.
JI Ruizhu, PAN Xiaojian. Simulation calculation of small S-band microstrip antenna [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(1): 61-63.