

DOI: 10.7652/xjtuxb201608011

非均匀广义对角加载稳健波束形成算法

王玉玺, 黄国策, 李伟, 刘剑, 狄旻珉
(空军工程大学信息与导航学院, 710077, 西安)

摘要: 为解决阵列天线在信号接收过程中利用一般对角加载算法在抑制噪声影响的同时降低干噪比、使零陷变浅的问题,提出了一种非均匀广义对角加载稳健波束形成算法。该算法首先根据接收数据协方差矩阵的特征值,对不同的信号自适应地选择不同加载因子,并利用选择的加载因子通过矩阵重构构造广义对角加载矩阵对接收数据进行加载处理,最后通过 Capon 算法得到波束形成向量。仿真结果表明:该算法在消除噪声影响的同时,可以有效展宽零陷并使零陷深度达到 -50 dB,而且通过非均匀加载降低输入信号的信噪比,在期望信号波达方向误差为 2° 时,比一般对角加载算法输出信号的干噪比高 10 dB,具有较好的稳健性。

关键词: 对角加载;特征分解;矩阵重构;波束形成

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0064-06

A Robust Beamforming Algorithm Based on Non-Uniform Generalized Diagonal Loading Method

WANG Yuxi, HUANG Guoce, LI Wei, LIU Jian, DI Minmin
(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A new non-uniform diagonal loading beamforming algorithm is proposed to solve the problem that the general diagonal loading method, which is utilized in array antenna receiving signal process to suppress the influence of noise, loads all kinds of signals with the same loading factor and shallows the null. The proposed method chooses different loading factors for different signals according to eigenvalues of the received signal covariance matrix, and then a generalized loading matrix with the selected loading factors is reconstructed to deal with the received signal. The beamforming vector is finally obtained through the Capon algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm eliminates the influence of noise and broaden the null to a depth of 50 dB. Moreover, the ratio of the desired signal to noise of the input signal is decreased through the non-uniform loading. When the DOA error of the desired signal is 2° , the output SINR of the proposed method is 10 dB bigger than that of the general diagonal loading method. Therefore, the proposed method has a better robust performance.

Keywords: diagonal loading; eigenvalue decomposition; matrix reconstruction; beamforming

在雷达或通信中,阵列天线通过自适应波束形成提高信号接收质量。理想情况下,波束形成能够将增益较大的主瓣对准期望信号,同时在干扰方向

形成较深的零陷。但是,由于阵元间距、通道幅频响应不一致性、阵元互耦以及方向估计等各种误差的存在,以及实际应用中快拍数据含有期望信号、快拍

收稿日期: 2015-11-03。 作者简介: 王玉玺(1989—),男,博士生;黄国策(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61302153)。

网络出版时间: 2016-05-17 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160517.1739.010.html>

次数的限制等,导致期望信号导向矢量失配和数据协方差矩阵估计存在误差,使波束质量下降,严重影响天线信号接收性能。因此,围绕误差对波束形成造成的影响,提高波束形成算法的稳健性具有重要意义,并成为阵列信号处理领域的研究热点。

针对噪声对波束形成质量的影响,文献[1]首次提出对角加载算法。该算法通过人为注入白噪声,一方面通过降低快拍数据中信噪比,减轻了期望信号导向矢量失配对波束形成质量的影响,避免了信号相消;另一方面通过人为增加噪声功率,解决了因快拍次数较小而造成的噪声子空间特征值发散,降低了噪声对波束形成的影响并提高了算法收敛速度。但是,该算法存在对角加载因子固定且加载电平不易确定的问题,影响了算法的性能及应用。针对上述问题,文献[2]分析了加载量对自适应阵列干扰信噪比的影响;文献[3]则进一步针对原有加载算法加载因子固定的问题,提出了一种根据阵列接收信号协方差矩阵特征值,计算对角加载因子的方法,在一定程度上实现自适应对角加载,提高了算法性能;近年来人们提出了一些理论上较为严格的稳健波束形成算法,如最差性能最优(worst-case-based, WCB)算法^[4]、稳健 Capon 算法^[5]、迭代稳健波束形成算法^[6]等,该类算法通过最小方差无失真响应准则和不确定集理论,解决导向矢量失配造成的波束质量下降问题,经过证明这类算法所求得的加权向量也均具有对角加载形式,而且算法能够通过具体的数学表达式求得对角加载值,但是该类算法中引入了导向矢量失配的不确定集,制约了算法在实际中的应用。文献[7]则利用对角加载算法,通过迭代消除期望信号导向矢量失配误差,从而提高波束形成质量。为了消除快拍数据中期望信号对波束形成质量的影响,文献[8]首次提出了利用 Capon 谱估计重构干扰噪声协方差矩阵的方法,该方法通过对信号来波方向以外的范围内进行积分重构,消除数据矩阵中的期望信号,从而降低算法对期望信号导向矢量失配的敏感性。在此基础上,文献[9-10]分别提出了各自不同的稳健波束形成算法,但是这类算法所基于的谱估计方法不准确,在快拍次数较少时重构矩阵仍存在较大误差会导致零陷变浅,而且该类算法形成零陷仍然较窄。文献[11]在干扰方向已知的基础上通过重构求得干扰信号投影矩阵,并利用该矩阵展宽了零陷,但算法仍然依靠传统的对角加载提高稳健性。

现有的基于对角加载的稳健波束形成算法都是

均匀对角加载,即算法对矩阵所有特征值施加相同加载因子,而且加载因子越大输入信号信噪比(R_{SN})越低、噪声子空间特征值的发散程度越小,算法对期望信号导向矢量失配越不敏感,波形越好,但是较大的加载因子降低了干噪比,使零陷变浅。针对加载因子选取这一矛盾,本文利用矩阵重构思想设计了一种基于非均匀广义对角加载的稳健波束形成算法。该算法针对不同的信号构造加载因子不同的广义对角加载矩阵,在实现噪声子空间特征值收敛的基础上,提高加载后输入信号的干噪比,并进一步降低输入信号的信噪比,提高算法鲁棒性。

1 研究背景

1.1 信号模型

假设有 N 元均匀线阵,在 k 时刻接收到来自方向 θ_0 和 $\theta_i, i=1, 2, \dots, P$ 的远场窄带期望信号和干扰信号且 $P+1 < N$, 天线接收数据为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{N}(k) = s_0(k)\mathbf{a}(\theta_0) + \sum_{i=1}^P s_i(k)\mathbf{a}(\theta_i) + \mathbf{N}(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)]^T$ 为阵列在 k 时刻接收到的 $N \times 1$ 维数据向量; $\mathbf{s}(k) = [s_0(k), s_1(k), \dots, s_P(k)]^T$ 为 k 时刻到达阵列的信号幅度; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$ 为阵列流形矩阵; $\mathbf{N}(k)$ 为 k 时刻天线接收到的 $N \times 1$ 维白噪声向量。当信号与信号、信号与噪声之间相互独立时,阵列天线的接收信号协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^H\} = \sigma_s^2\mathbf{a}(\theta_0)\mathbf{a}^H(\theta_0) + \sum_{i=1}^P \sigma_i^2\mathbf{a}(\theta_i)\mathbf{a}^H(\theta_i) + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (2)$$

式中: $E\{\cdot\}$ 表示数学期望; $\sigma_s^2, \sigma_i^2, \sigma_n^2$ 分别为信号功率、干扰功率和噪声功率; $\mathbf{I}$ 为 N 维单位阵。在实际应用中,通常利用有限次快拍数据的估计值来代替 $\mathbf{R}$, 即

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}(i)\mathbf{X}(i)^H \quad (3)$$

式中: K 为快拍次数。利用标准 Capon 波束形成计算公式,可以得到阵列加权向量为

$$\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0)\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{a}(\theta_0)} \quad (4)$$

1.2 一般均匀对角加载及其存在的问题

由于训练数据中含有期望信号,标准 Capon 算法对期望信号导向矢量误差较为敏感,在信噪比较高时有可能造成期望信号相消,而且当快拍次数小

于阵元数时,所得的估计矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 是一个病态矩阵,噪声子空间特征值扩散程度较大,在计算阵列自适应加权向量时,小特征值和对应的特征向量扰动都会参与到自适应加权值的计算中,使得自适应波束性能下降,导致主波束发生畸变,副瓣电平较高甚至淹没了主瓣。

对角加载算法能够较好地解决噪声影响,现有的对角加载算法都是基于均匀对角加载,基本原理如下

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H (\hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{w} \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0) = 1$$

式中: λ 为对角加载因子; $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为期望信号导向矢量。求得的加权向量为

$$\mathbf{w}_{\text{dl}} = \frac{(\hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) (\hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (6)$$

加载后的阵列方向图为

$$G(\mathbf{w}_{\text{dl}}, \theta) = \mathbf{w}_{\text{dl}}^H \mathbf{a}(\theta) =$$

$$\frac{\mu}{\lambda_N^2} \left[\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta) - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{a}(\theta) \right] =$$

$$\frac{\mu}{\lambda_N^2} \left[\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{a}(\theta) - \sum_{i=1}^P \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{a}(\theta) - \right.$$

$$\left. \sum_{i=P+1}^{N-1} \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \mathbf{a}(\theta) \right] =$$

$$G(\mathbf{a}(\theta_0), \theta) - \sum_{i=1}^P \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{v}_i G(\mathbf{v}_i, \theta) -$$

$$\sum_{i=P+1}^{N-1} \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{v}_i G(\mathbf{v}_i, \theta) \quad (7)$$

式中: $\mu = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_0) (\hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}$; λ_i 为加载前协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 的特征值,且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$; $\mathbf{v}_i$ 为特征值对应的特征向量。式(7)等号右边3项分别为静态阵列响应、干扰特征波束响应加权和、噪声特征波束响应加权和。

由式(7)可知,对于噪声特征值,即当 $P+1 \leq i < N$ 时,加载越大,噪声特征波束加权因子 $\frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda}$ 就越小,噪声对波束质量的影响也越小,但是加载量过大则会导致干扰特征波束加权因子变小,零陷变浅干扰抑制能力降低,进而导致输出信号干噪比 R_{SIN} 降低。因此,一般的均匀对角加载所带来的上述矛盾问题,已成为困扰加载因子选择的主要原因,影响算法的应用。

2 非均匀广义对角加载稳健波束形成算法

为了解决一般均匀对角加载在降低噪声影响的

同时干扰零陷变浅这一问题,本文提出利用非均匀对角加载思想,根据不同来波方向的信号性质选择不同的加载因子,然后利用协方差矩阵重构方法构造新的广义对角加载矩阵的稳健波束形成算法。本文算法具体描述如下。

阵列在接收到快拍数据后,由式(3)估计信号协方差矩阵并进行特征值分解

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H, \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \quad (8)$$

令 $\lambda_j = \lambda_1$, $\lambda_n = \frac{\sum_{i=P+1}^N \lambda_i}{N-P-1}$, $\lambda_s = \lambda_N$, 假设期望信号来波方向为

$$\theta_0 \in \theta_s = (\theta_0 - \Delta\theta, \theta_0 + \Delta\theta) \quad (9)$$

干扰信号来波方向为

$$\theta_i \in \theta_j = (\theta_i - \Delta\theta, \theta_i + \Delta\theta) \cup \dots \cup (\theta_P - \Delta\theta, \theta_P + \Delta\theta) \quad (10)$$

式中: $i=1, 2, \dots, P$; $\Delta\theta$ 为设置的信号方向波动参数,且 $\theta_s \cap \theta_j = \emptyset$ 。在天线阵列结构已知的条件下,可计算广义对角加载矩阵为

$$\mathbf{R}_{\text{dl}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \lambda(\theta) \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) d\theta \quad (11)$$

$$\text{式中: } \lambda(\theta) = \begin{cases} \lambda_s, & \theta \in \theta_s \\ \lambda_j, & \theta \in \theta_j \\ \lambda_n, & \text{其他} \end{cases}$$

数据按照式(5)经过加载处理后,再通过 Capon 方法计算得到的最终阵列加权向量为

$$\mathbf{w}_{\text{dl}} = \frac{(\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{R}_{\text{dl}})^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) (\hat{\mathbf{R}} + \mathbf{R}_{\text{dl}})^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (12)$$

通过非均匀广义对角加载处理后,由式(7)可知,对于噪声特征波束响应加权因子有

$$\frac{\lambda_i + \lambda_n - \lambda_N - \lambda_n}{\lambda_i + \lambda_n} \cong 0$$

$$i = P+1, P+2, \dots, N-1 \quad (13)$$

该加权因子能够较好地消除干扰噪声的影响,改善波形,同时与现有均匀加载算法相比,在干扰方向上通过大的对角加载,提高了输入信号的干噪比,加深了干扰零陷。从阵列响应公式可以看出,对于干扰特征波束响应加权因子有

$$\frac{\lambda_i + \lambda_j - \lambda_N - \lambda_n}{\lambda_i + \lambda_j} > \frac{\lambda_i - \lambda_N}{\lambda_i + \lambda} \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, P$$

而且由于在干扰信号来波方向一定范围 $(\theta_i - \Delta\theta, \theta_i + \Delta\theta)$ 内注入较大功率的噪声,相当于人为增加了虚拟干扰,相比于原有的对角加载算法零陷得到展

宽,能够较好地解决因为抖动或干扰源快速移动造成干扰信号移出零陷,输出信号干噪比变差的问题。而对于期望信号方向,由于加载因子 $\lambda_s < \lambda_n$,新加载算法处理后的输入信号信噪比(R_{SN})比原有均匀加载算法处理后的输入信号 R_{SN} 更低,因而波束形成算法对期望信号导向矢量失配具有更强的鲁棒性。本文算法的具体步骤如下:

步骤 1 利用式(3)计算接收信号协方差矩阵;

步骤 2 对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征值分解,并确定对角加载因子;

步骤 3 根据信号来波方向,通过式(11)计算对角加载矩阵;

步骤 4 利用得到的广义对角加载矩阵对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行加载处理;

步骤 5 根据 Capon 算法计算非均匀广义对角加载后的阵列加权向量 $\mathbf{w}_{dl}$ 。

3 实验仿真与性能分析

仿真采用阵元数为 12 的均匀线阵,信号载频为 $f_0 = 10$ GHz,阵元间距为半个波长 $d = \frac{c}{2f_0}$,其中 c 为光速。阵列所加噪声为高斯白噪声,假设干扰和目标信号均为远场窄带随机信号,且干扰与信号之间相互独立。为验证算法有效性,所提算法将与一般对角加载算法^[1]、最差性能最优算法^[4]和正交投影算法^[12]在相同条件下进行仿真对比,所有的实验结果均来自 100 次蒙特卡罗实验。

仿真 1 设信号方向波动参数 $\Delta\theta = 5^\circ$,期望信号来波方向为 0° ,干扰信号来波方向为 30° ,干噪比 $R_{IN} = 30$ dB,快拍次数为 100。一般对角加载算法加载因子选取为接收数据矩阵最小特征值的 10 倍,最差性能最优算法导向矢量不确定集 $\epsilon = 3$ 。图 1 为信噪比 $R_{SN} = 10$ dB 无方向失配误差情况下各算法阵列方向图。由图 1 可以看出,本文所提非均匀广义对角加载算法相比其他算法不仅加深了零陷深度而且零陷得到展宽,能够较好抵抗因为自身平台抖动或干扰源快速移动而导致的干扰信号移出零陷问题。图 2 则为各算法输出 R_{SIN} 随输入信噪比(R_{SN})的变化情况,在无误差情况下,新算法输出性能与理想情况几乎相同,随输入 R_{SN} 的增加,输出信干噪比优于其他 3 种算法。

仿真 2 设信号方向波动参数 $\Delta\theta = 5^\circ$,期望信号真实来波方向为 0° ,方向估计存在误差且误差变化范围为 $[-10^\circ, 10^\circ]$,其他参数与仿真 1 相同。图 3 显

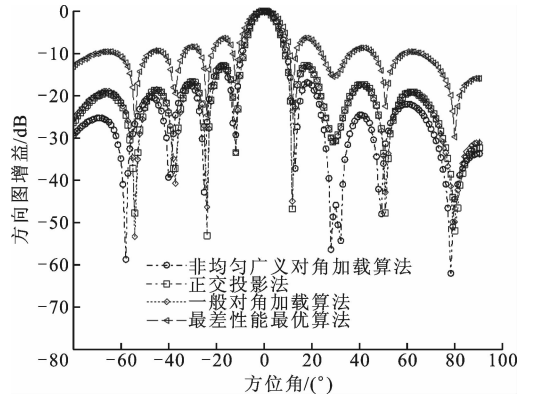


图 1 $R_{SN} = 10$ dB 时不同算法的波束形成图

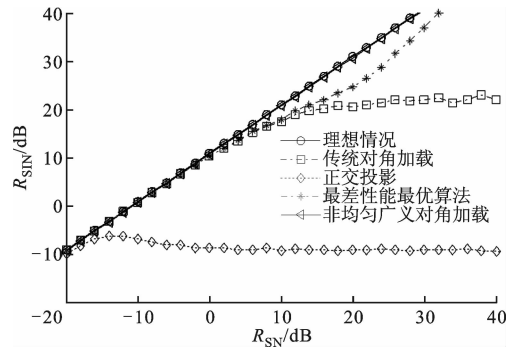


图 2 不同算法输出信号干噪比随输入信噪比的变化情况

示了各算法输出信号干噪比 R_{SIN} 随期望信号 DOA 估计误差 $\hat{\theta}$ 的变化情况。相比于其他算法,本文算法由于采用非均匀对角加载,在信号方向加载量 $\lambda_s < \lambda_n$ 时,加载后数据输入信号信噪比小于原始信号信噪比,因此算法对期望信号方向失配具有一定鲁棒性,在一定误差范围内输出 R_{SIN} 变化较小。最差性能最优和一般对角加载算法的输出 R_{SIN} 则随着 DOA 误差增大,性能急剧下降。图 4 显示了当 $\hat{\theta}$ 为 3° 时,各算法的输出 R_{SIN} 随输入 R_{SN} 的变化情况。由该图可以看出,当输入 R_{SN} 较小时,本文算法的性能与最差性能最优和一般对角加载算法相同,但是当输入 R_{SN} 较高时,一般对角加载算法性能急剧下降,甚至出现信号相消,最差性能最优算法也随着输入 R_{SN} 的增加性能降低。而对于本文算法,在一定误差情况下,算法的输出 R_{SIN} 较理想情况仅下降了 2 dB 左右,而且随着输入 R_{SN} 的增加而增加,不会出现信号相消,因此对期望信号方向失配具有较好的稳健性。

仿真 3 设期望信号和干扰信号来波方向为 0° 和 30° ,信号方向波动参数 $\Delta\theta = 5^\circ$,期望信号和干扰信号与噪声功率比值分别为 10 dB 和 30 dB,快拍次数变化范围为 $[10, 200]$,其他条件与仿真 1 相同。图

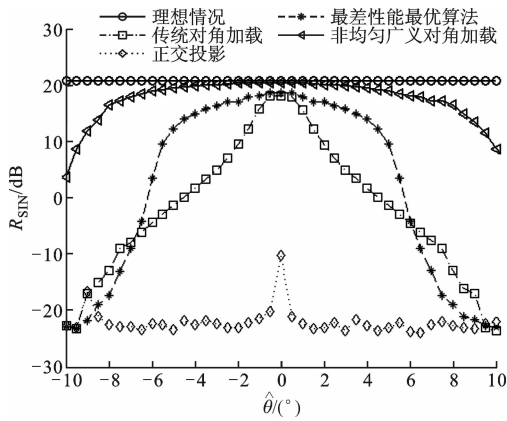


图3 不同算法输出信号干噪比随 DOA 误差变化情况

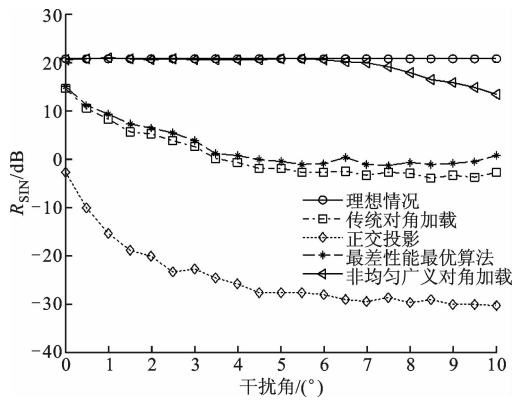
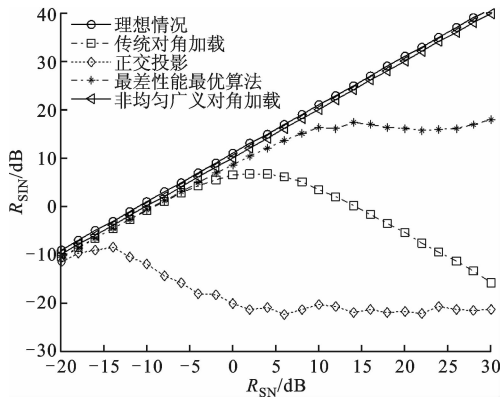


图6 不同算法的输出信号干噪比随干扰角度变化情况

图4 $\hat{\theta}$ 为 3° 时不同算法的输出信号干噪比
随信噪比变化情况

5 表示了不同算法的输出信号 R_{SIN} 随快拍次数的变化情况。由图 5 可见:当快拍次数较少时,用于计算阵列加权向量的协方差矩阵估计误差较大,因此最差性能最优算法和一般对角加载算法信号输出 R_{SIN} 较低,而且这两种算法在本质上相同,受快拍次数的影响几乎相同;本文所提算法的输出 R_{SIN} 不受快拍次数影响,因此能够较好地应用于对加权向量更新要求较快的时变环境中。

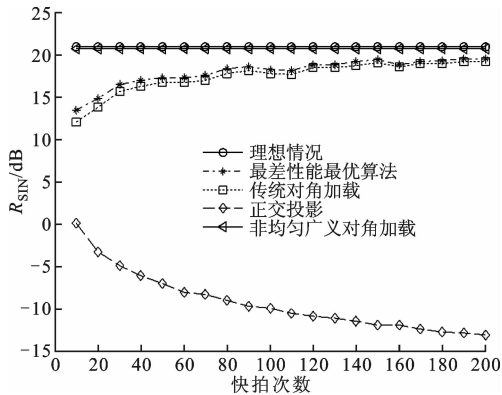


图5 不同算法的输出信号干噪比随快拍次数变化情况

仿真 4 设期望信号来波方向为 0° , 干扰信号来波方向为 30° , 信号方向波动参数 $\Delta\theta=5^\circ$, 假设干扰信号角度偏移变化范围为 $[0^\circ, 10^\circ]$, 期望信号信噪比和干扰信号干噪比分别为 10 dB 和 30 dB, 其他参数与仿真 1 相同。图 6 显示了各算法输出信号 R_{SIN} 随干扰信号角度偏移的变化情况。对于其他 3 种算法, 当干扰信号角度发生偏移时, 干扰移出零陷, 造成信号输出信干噪比急剧下降。而对于本文所提新算法, 当干扰信号偏移角度小于预先设置的信号方向波动参数 $\Delta\theta$ 时, 偏移的干扰信号仍然在零陷之内, 输出 R_{SIN} 没有任何变化, 算法性能不受任何影响, 但是随着干扰偏移角度的逐渐增大, 当偏移角度大于 $\Delta\theta$ 时, 干扰信号移出零陷, 进而导致输出信号 R_{SIN} 下降。

仿真 5 设期望信号来波方向为 0° , 干扰信号来波方向为 30° , 信噪比、干噪比分别为 10 dB 和 30 dB, 快拍次数为 100, 信号方向波动参数变化范围为 $[0^\circ, 10^\circ]$, 其他条件与仿真 1 相同。图 7 为本文算法输出信号干噪比随方向波动参数变化的情况。由图 7 可见, 输出信号干噪比 R_{SIN} 随方向波动参数 $\Delta\theta$ 的增大而缓慢降低, 当 $\Delta\theta=10^\circ$ 时算法性能与理想情况下相比大约下降了 1 dB, 因此适当选取合适的波动参数对算法输出 R_{SIN} 性能影响较小, 可以忽略。

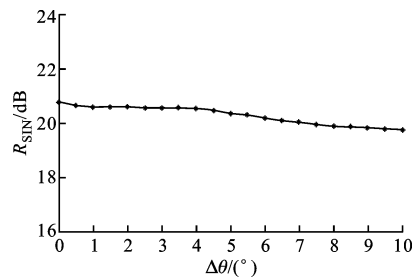


图7 输出信号干噪比随方向波动参数变化情况

4 结 论

本文针对一般的对角加载算法加载量固定以及均匀加载后零陷变浅这一问题,提出基于非均匀广义对角加载的稳健波束形成算法。算法根据接收信号协方差矩阵的特征值分别确定不同的加载因子,根据不同性质的信号来波方向,利用矩阵重构思想构建新的广义对角加载矩阵,不仅能够通过加载抑制噪声影响,而且可以在保证零陷深度的同时灵活调整零陷宽度,解决因自身平台或干扰源快速移动造成的干扰移出零陷的情况。此外,本文算法通过有针对性的非均匀加载,降低了快拍数据的信噪比,进一步提高了算法对期望信号导向矢量失配的鲁棒性。

参考文献:

- [1] COX H, ZESKIND R, OWEN M. Robust adaptive beamforming [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1987, 35(10): 1365-1376.
- [2] 陈晓初. 自适应阵对角线加载研究 [J]. 电子学报, 1998, 26(4): 29-35.
CHEN Xiaochu. Study on adaptive array diagonal loading [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(4): 29-35.
- [3] 张小飞, 张胜男, 徐大专. 自适应对角线加载的波束形成算法 [J]. 中国空间科学技术, 2007, 4(2): 66-70.
ZHANG Xiaofei, ZHANG Shengnan, XU Dazhuan. Adaptive diagonal loading beamforming algorithm [J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 4(2): 66-70.
- [4] 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.
- [5] LI J, STOCIA P, WANG Z. On robust Capon beamforming and diagonal loading [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2003, 51(7): 1702-1715.
- [6] NAI S E, SER W, YU Z L, et al. Iterative robust minimum variance beamforming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4): 1601-1611.
- [7] 金伟, 贾维敏, 姚敏立. 迭代对角加载采样矩阵求逆鲁棒自适应波束形成 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1120-1125.

- JIN Wei, JIA Weimin, YAO Minli. Iterative diagonally loaded sample matrix inverse robust adaptive beamforming [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(5): 1120-1125.
- [8] YUJIE G, LESHEM A. Robust adaptive beamforming based on interference covariance matrix reconstruction and steering vector estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing Vector Estimation, 2012, 60(7): 3881-3885.
- [9] YANG X P, LU Y, SUN Y, et al. Improved orthogonal projection approach utilising interference covariance matrix reconstruction for adaptive beamforming [J]. Electronics Letters, 2014, 50(20): 1446-1447.
- [10] LU Z, LI Y, GAO M, ZHANG Y. Interference covariance matrix reconstruction via steering vectors estimation for robust adaptive beamforming [J]. Electronics Letters, 2013, 49(22): 1373-1374.
- [11] 李文兴, 毛晓军, 孙亚秀. 一种新的波束形成零陷展宽算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2882-2888.
LI Wenxing, MAO Xiaojun, SUN Yaxiu. A new algorithm for null broadening beamforming [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(12): 2882-2888.
- [12] SUBBARAM H, ABEND K. Interference suppression via orthogonal projections; a performance analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(9): 1187-1194.
- [13] 宋虎, 顾红, 王建, 等. 主瓣干扰下的自适应旁瓣抵消算法设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1723-1728.
SONG Hu, GU Hong, WANG Jian, et al. Adaptive multiple side-lobe canceller design for main-lobe jammer [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1723-1728.
- [14] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.
- [15] 李洪涛, 陈诚, 曾文浩, 等. 基于导向矢量估计的鲁棒自适应波束形成算法 [J]. 电波科学学报, 2015, 30(1): 188-193.
LI Hongtao, CHEN Cheng, ZENG Wenhao, et al. Steering vector estimation based robust adaptive beamforming algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(1): 188-193.

(编辑 刘杨)