

强干扰背景下二维弱信号 DOA 估计的 修正投影阻塞法

董 惠 徐婷婷 王 纯

(西安建筑科技大学信控学院, 西安 710055)

摘 要: 针对强干扰背景下的二维微弱信号波达方向 (Direction of Arrival, DOA) 估计问题, 提出了一种基于修正投影阻塞的算法。该算法通过构造干扰子空间的正交投影矩阵作为干扰阻塞矩阵, 对接收阵列信号做预处理, 从而达到抑制干扰的目的。本文对提出的修正投影阻塞法进行了理论分析, 并在常见二维阵型 (如面阵、十字阵、Y 阵) 上进行仿真和性能对比, 仿真结果表明: 该方法无需已知干扰角度, 在多个干扰条件下能有效估计弱信号的波达方向, 且不损失自由度。

关键词: 强干扰/微弱信号; 波达方向估计; 修正投影阻塞

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)02-0221-07

Two-Dimensional Weak Signal DOA Estimation Based on Corrected Projection Jam Method in the Presence of Strong Interference

DONG Hui XU Ting-ting WANG Chun

(School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: For weak signals direction-of-arrival (DOA) estimation of two-dimensional in the presence of strong interference, a new algorithm based on the corrected projection jam method is presented. This paper constructs the orthogonal projection matrix of jamming subspace as block matrix and then pre-processes the received array signal vector, so as to constrain the strong interferences. In this paper, the corrected projection jam method is theoretically analyzed. simulation and performance comparison are carried out for the common two-dimensional array (such as plane array, cross array and Y array). The simulation results show that this method can effectively estimate DOA of weak signals in condition of multiple strong signals present, which is unaffected by the given angle information of strong interference without losing degrees of freedom.

Key words: strong interference/weak signal; direction-of-arrival estimation; corrected projection jam

1 引言

目前, 基于阵列天线的微弱信号检测和参数估计方法正在被广泛的应用于雷达、通信、导航、声纳以及地震探测等诸多领域。但实际工作环境复杂, 接收数据中经常是强弱信号并存的情况, 常规的 DOA 估计方法, 如 MUSIC 和 ESPRIT 等方法就无法准确检测出微弱信号, 导致系统对微弱信号的波达方向估计精度受到很大影响。

针对强干扰下微弱信号 DOA 估计问题, 已有处理方法主要有四类: 一是以柴立功、徐亮等人为代表的特征波束形成法^[1-4], 该方法通过在子阵上进行波束形成零陷以抗干扰的方法进行弱信号的 DOA 估计, 该方法具有运算量小和弱信号估计精度高的优点; 二是 Li 等人提出的 RELAX (松弛算法)^[5-6], 该方法由于对信号分离并反复迭代, 因此计算量很大; 三是陈辉等人的干扰阻塞法 (JJM)^[7-9], 该方法通过先验知识构造阻塞矩阵然后对干扰进行预处理, 因此

要求强干扰方向精确已知;四是以张静等人为代表提出的噪声子空间扩充法^[10-12],该方法将强干扰导向矢量所在空间纳入噪声子空间进而构造出扩展的噪声子空间,再利用常规 MUSIC 算法即可得到弱信号的 DOA 估计,但噪声子空间扩充法在对子空间扩张后的输出信号进行角度估计时由于采取的是传统 MUSIC 估计方法,继而带来二维谱峰搜索运算量大、复杂度高的问题。

以上研究大多基于一维线阵的讨论,少有涉及二维。本文提出了一种基于修正投影阻塞法的二维微弱信号 DOA 估计研究新方法。该方法同时适用于一维和二维,无需已知干扰角度,运算量适中,且在对输出信号进行角度估计时可采用除 MUSIC 方法外的 DOA 估计算法(如 ESPRIT 算法等),这样就有可能避免进行二维谱峰搜索,从而大大降低了采用 MUSIC 算法时二维谱峰搜索的计算复杂度。

2 信号模型

为了说明二维修正投影阻塞法的一般性,本文考虑如图 1 所示的二维等间距排列的 Y 型阵列为信号模型。

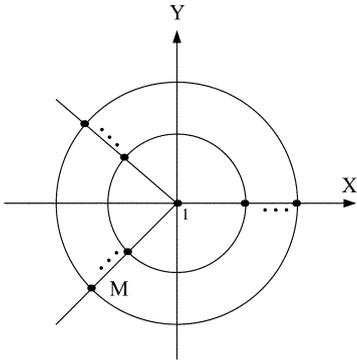


图 1 Y 型阵列

Fig. 1 Y array

假设阵元数 M 等于通道数,假设阵列中各阵元是各向同性的且不存在通道不一致、互耦等因素的影响,噪声为相互独立的零均值高斯白噪声,且与信号不相关,阵列间距 d 为信号中心频率对应的半波长。假定空间有 L 个远场窄带信号入射到阵列,其中包括 q 个强干扰和 p 个弱信号,方位角和俯仰角分别为 (θ_i, φ_i) 。则阵列接收数据模型为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}_s(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})\mathbf{S}(t) + \mathbf{A}_j(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})\mathbf{J}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (1)$$

式中,

$$\mathbf{A}_s(\boldsymbol{\theta}_s, \boldsymbol{\varphi}_s) = (a_s(\theta_{s1}, \varphi_{s1}), a_s(\theta_{s2}, \varphi_{s2}), \dots, a_s(\theta_{sp}, \varphi_{sp}))$$

$$\mathbf{A}_j(\boldsymbol{\theta}_j, \boldsymbol{\varphi}_j) = (a_j(\theta_{j1}, \varphi_{j1}), a_j(\theta_{j2}, \varphi_{j2}), \dots, a_j(\theta_{jq}, \varphi_{jq}))$$

分别为信号阵列流型矩阵和干扰阵列流型矩阵;入射信号矢量 $\mathbf{S}(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_p(t)]^T$;入射干扰矢量 $\mathbf{J}(t) = [J_1(t), J_2(t), \dots, J_q(t)]^T$;阵列接收加性高斯白噪声 $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$

其中,信号导向矢量:

$$\begin{aligned} a_s(\theta_{si}, \varphi_{si}) &= (1 e^{jE_{s1}} \dots e^{jWE_{s1}} \\ &e^{j(-\sin 45^\circ E_{s1} + \cos 45^\circ E_{s2})} e^{j(-2\sin 45^\circ E_{s1} + 2\cos 45^\circ E_{s2})} \\ &\dots e^{j(-W\sin 45^\circ E_{s1} + W\cos 45^\circ E_{s2})} e^{j(-\sin 45^\circ E_{s1} - \cos 45^\circ E_{s2})} \\ &e^{j(-2\sin 45^\circ E_{s1} - 2\cos 45^\circ E_{s2})} \dots e^{j(-W\sin 45^\circ E_{s1} - W\cos 45^\circ E_{s2})}) \end{aligned} \quad (2)$$

干扰导向矢量:

$$\begin{aligned} a_j(\theta_{ji}, \varphi_{ji}) &= (1 e^{jE_{j1}} \dots e^{jWE_{j1}} \\ &e^{j(-\sin 45^\circ E_{j1} + \cos 45^\circ E_{j2})} e^{j(-2\sin 45^\circ E_{j1} + 2\cos 45^\circ E_{j2})} \\ &\dots e^{j(-W\sin 45^\circ E_{j1} + W\cos 45^\circ E_{j2})} e^{j(-\sin 45^\circ E_{j1} - \cos 45^\circ E_{j2})} \\ &e^{j(-2\sin 45^\circ E_{j1} - 2\cos 45^\circ E_{j2})} \dots e^{j(-W\sin 45^\circ E_{j1} - W\cos 45^\circ E_{j2})}) \end{aligned} \quad (3)$$

T 表示转置 λ 表示入射信号载波波长,

$$W = \frac{M-1}{3};$$

$$E_{s1} = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta_{si} \sin \varphi_{si}, E_{s2} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_{si} \sin \varphi_{si}, si = 1, 2, \dots, p;$$

$$E_{j1} = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \theta_{ji} \sin \varphi_{ji}, E_{j2} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_{ji} \sin \varphi_{ji}, ji = 1, 2, \dots, q$$

3 修正投影阻塞法的提出

3.1 算法描述

首先对接收信号的协方差矩阵进行特征分解:

$$\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}^H(t)\mathbf{X}(t)] = \mathbf{U}^H \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{U} \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$, $\lambda_n > \lambda_{n+1}$ ($n = 1, 2, \dots, M-1$), 特征值由大到小的顺序排列,其相应的列矢量组成特征矩阵 $\mathbf{U} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M)$,根据子空间理论则干扰子空间、信号子空间、噪声子空间分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_j &= (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_q) \\ \mathbf{U}_s &= (\mathbf{v}_{q+1}, \mathbf{v}_{q+2}, \dots, \mathbf{v}_{p+q}) \\ \mathbf{U}_n &= (\mathbf{v}_{p+q+1}, \mathbf{v}_{p+q+2}, \dots, \mathbf{v}_M) \end{aligned} \quad (5)$$

构造与强干扰子空间正交的修正投影阻塞矩阵 \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{U}_j (\mathbf{U}_j^H \mathbf{U}_j)^{-1} \mathbf{U}_j^H \quad (6)$$

利用 \mathbf{B} 对全局子空间作预变换得到

$$\mathbf{D} = \mathbf{B}\mathbf{U} = \mathbf{B}[\mathbf{U}_j, \mathbf{U}_s, \mathbf{U}_n] = [\mathbf{0}_j, \mathbf{D}_{p+1}, \mathbf{D}_{p+2}, \dots, \mathbf{D}_M] \quad (7)$$

即经过修正投影阻塞变换后的矩阵 D 只与弱信号和噪声有关,与干扰无关,实现了对强干扰的抑制,经过变换后的数据矢量为:

$$Y(t) = BX(t) \quad (8)$$

经过修正投影变换后的数据协方差矩阵为:

$$R_Y = BUR_s U^H B^H + \sigma^2 BB^H \quad (9)$$

由于经过修正投影变换后,强干扰被阻塞,从而消除了干扰对弱信号的影响。然后,再对接收矩阵做二次特征值分解,获得新的信号子空间 U'_s 和噪声子空间 U'_N 。此时, U'_s 只与弱信号有关, U'_N 与弱信号方向的导向矢量正交,利用空间谱函数

$$P(\theta, \varphi) = \frac{1}{a^H(\theta, \varphi) U'_N U'^H_N a(\theta, \varphi)} \quad (10)$$

就可以估计出弱信号的方位角和俯仰角。

3.2 算法流程

步骤 1 接收阵列数据的协方差矩阵:

$$R_x = E(X(t)X(t)^H) \quad (11)$$

步骤 2 对协方差矩阵做特征分解,按从大到小顺序排列: $R_x = U^H \Lambda U$, $U = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_M)$

$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$, $\lambda_n > \lambda_{n+1}$ ($n = 1, 2, \dots, M-1$) 则强干扰子空间为:

$$U_j = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_q) \quad (12)$$

步骤 3 构造同干扰导向矢量正交的修正投影矩阵 $B = I - U_j(U_j^H U_j)^{-1} U_j^H$

步骤 4 按式(8)对接收数据矢量做预处理;

步骤 5 做第二次特征值分解,同样仿照步骤 2 按照从大到小的顺序排列,从而得到噪声子空间 $U'_N = (\nu'_{p+1}, \nu'_{p+2}, \dots, \nu'_M)$

步骤 6 按照式(10)利用传统的 MUSIC 方法进行谱峰搜索,就可以得到弱信号的方位角和俯仰角。

3.3 算法分析

传统干扰阻塞法要求干扰角度信息精确已知,而在实际工程应用中,由于各种误差不可避免,实际的阵列流型往往会出现一定程度的偏差和扰动。用传统二项式对消方法构造图 1 所示的二维 Y 阵干扰阻塞矩阵,如下:

$$B_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{for } l=1 \\ -e^{-j(l-1)Z_1} & \text{for } l=k+1 \& l=2, 3, \dots, W \\ -e^{-j(l-W)Z_2} & \text{for } l=k+1 \& l=W+1, W+2, \dots, 2W \\ -e^{-j(l-2W)Z_3} & \text{for } l=k+1 \& l=2W+1, 2W+2, \dots, M \end{cases} \quad (13)$$

其中, k, l 分别表示阻塞矩阵的行和列,且

$$k = 1, 2, \dots, M-1; l = 1, 2, \dots, M;$$

$$Z_1 = E_{j_1}$$

$$Z_2 = -\sin 45^\circ E_{j_1} + \cos 45^\circ E_{j_2}$$

$$Z_3 = -\sin 45^\circ E_{j_1} - \cos 45^\circ E_{j_2}$$

下面以 4 阵元 Y 阵为例,即当 $M=4$ 时,按公式(13)构建阻塞矩阵如下:

$$B_{kl} = \begin{bmatrix} 1 & -e^{-jZ_1} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -e^{-jZ_2} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -e^{-jZ_3} \end{bmatrix}_{3 \times 4}$$

此时 $B_{kl} \cdot a_j(\theta_i, \varphi_i) = 0$, 但是当存在有阵列相位误差 $(\Delta\theta_i, \Delta\varphi_i)$ 时, $B_{kl} \cdot a_j(\theta_i + \Delta\theta_i, \varphi_i + \Delta\varphi_i) \neq 0$

由此可以看出当存在阵列误差时,传统干扰阻塞法难以有效抑制强干扰,从而使估计精度受到很大影响。

而本文构建阻塞矩阵的方法是在已知干扰个数的基础上建立起来的,不是在已知干扰来波角度的基础上,因此,即便阵列相位有误差,在对接收数据的做第一次特征分解得到干扰子空间的过程中,阵列误差部分就已经被考虑在内,由此生成的阻塞矩阵 B 也已经和存在有阵列误差的导向矢量适配:

$$B = I - U_j(U_j^H U_j)^{-1} U_j^H \quad (14)$$

且与来波角度无关,因此即便有阵列相位误差 $(\Delta\theta_i, \Delta\varphi_i)$, 依然满足:

$$B \cdot a_j(\theta_i + \Delta\theta_i, \varphi_i + \Delta\varphi_i) = 0 \quad (15)$$

综上所述,本文算法只需已知强干扰个数,通过特征分解得到强干扰对应的子空间,根据干扰子空间构造干扰修正投影阻塞矩阵,继而而对快拍数据矢量作预变换,即可利用常用的空间谱估计算法估计弱信号的 DOA。与干扰阻塞法相比,本文算法无需预先已知干扰的来波角度,不受阵列相位误差的影响,并且不会牺牲有限阵元数量。即便多个干扰并存的情况下,本文算法仍然能够精确估计出弱信号的 DOA(见以下仿真结果)。

该方法也适用于一维线阵(见 4.1)。

4 仿真及性能分析

4.1 一维分析

如引言所述,目前对一维强干扰下的弱信号 DOA 估计问题已有较多研究,现将具有代表性的方法(扩充噪声子空间法和干扰阻塞法)估计性能与本

文提出的修正投影阻塞法进行对比,以阐述本文算法的特点。

仿真1 不同一维方法对比

假设阵列中各阵元是各向同性的,噪声为相互独立的零均值高斯白噪声,且与信号不相关,采用16根阵元组成的均匀等距线型阵列,其间距 d 为期望信号中心频率对应的半波长。三个信号源来波方向分别为 $-30^\circ, 0^\circ, 20^\circ$, 干噪比 $JNR = 40\text{dB}$, 信噪比 SNR 从 -20dB 到 20dB ,两个干扰角度为 $-60^\circ, 50^\circ$,噪声是均值为0方差为1的高斯白噪声,每次仿真运行300次 Monte-Carlo 实验。

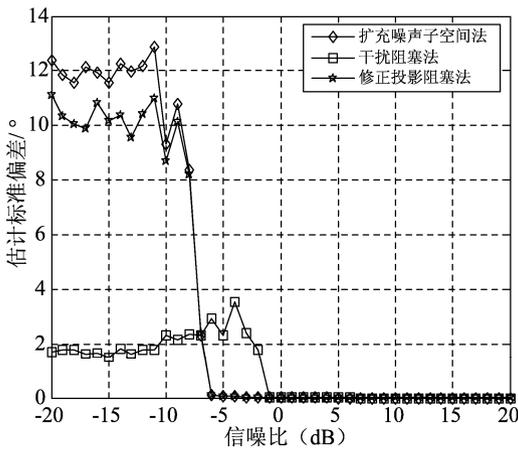


图2 信噪比与估计标准偏差的关系

Fig. 2 the relationship of SNR and estimated standard deviation

估计标准偏差 R 定义为:

$$R = \sqrt{1/2K \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^P |\theta_i - \theta_{ik}|^2} \quad (16)$$

K 为 Monte-Carlo 实验次数, P 为弱信号个数; θ_i, θ_{ik} 分别为每次试验中第 i 个信号 DOA 的真实值和估计值。

由图2可以看出,修正投影阻塞法估计成功的信噪比要求(-6dB)比干扰阻塞法(-3dB)低。虽然干扰阻塞法在低 SNR 情况下估计偏差比本文方法小,但在实际工程应用中,阵列会存在相位误差,在存在阵列误差时干扰阻塞法测角精度会受到影响,且大于本文方法,如下图3所示。

仿真2 阵列相位误差

仿真中假设相位误差的方差从0—5%,对传统干扰阻塞法、扩充噪声子空间法、本文的修正投影阻塞法的估计标准偏差同相位误差的关系做以对比,其他仿真条件同仿真1。每次仿真运行300次 Monte-Carlo 实验。如图3所示。

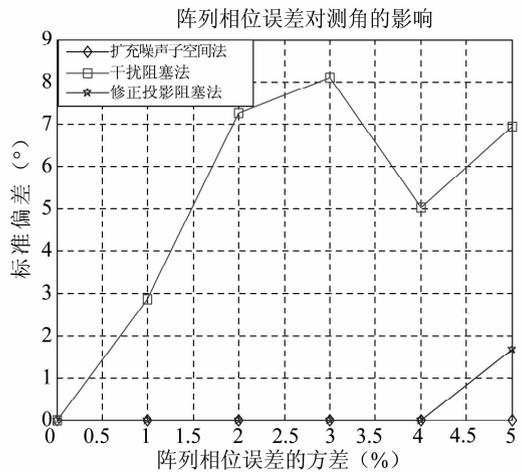


图3 阵列相位误差对估计精度的影响

Fig. 3 The array phase error reacted on the estimation accuracy

从图3中可以看出,本文算法的阵列相位误差对估计精度的影响小于干扰阻塞法。

综上所述,可以看出在一维条件下,相较于噪声子空间扩充法,本文方法在低信噪比情况下的估计标准偏差更低;相较于干扰阻塞法则对阵列相位误差的鲁棒性更高。

4.2 二修正投影阻塞法

在二维仿真试验中,为说明一般性,同样考虑信号模型为均匀间距的Y型阵列,由25个各向同性阵元组成,归一化阵元间距 $d=0.5$,快拍数 $N=300$ 。

仿真3 算法实现

假定空间有5个远场窄带信号入射到阵列,包括2个强干扰和3个微弱信号,方位角和俯仰角为 $(60^\circ, 30^\circ), (160^\circ, 40^\circ); (30^\circ, 10^\circ), (90^\circ, 30^\circ), (120^\circ, 65^\circ)$,信噪比 $SNR=0\text{dB}$,干噪比 $JNR=40\text{dB}$ 。图4(a)为传统 MUSIC 法谱估计的结果,图4(b)为修正投影阻塞法的谱估计结果。

Y阵25阵元传统MUSIC法

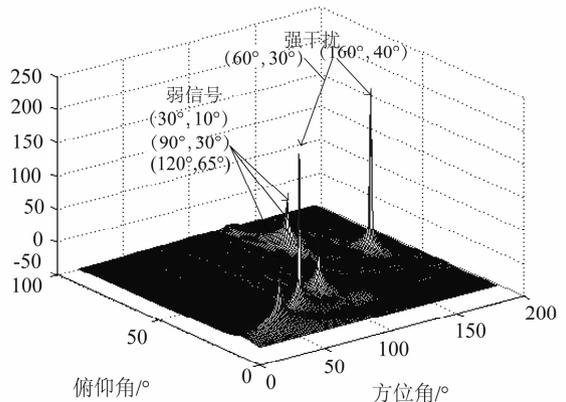


图4(a) 传统 MUSIC 法谱估计的结果

Fig. 4(a) the traditional MUSIC spectral estimation results

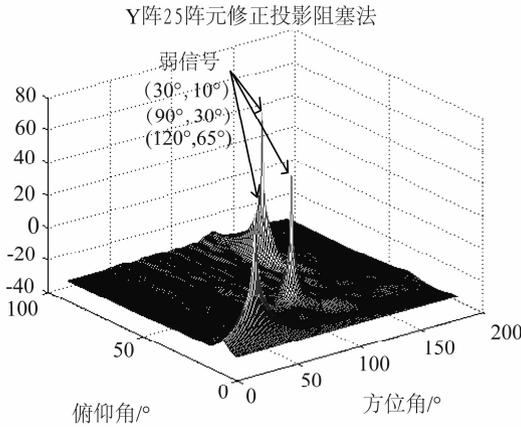


图 4(b) 本文算法谱估计结果

Fig. 4(b) the corrected projection jam method spectral estimation results

由图 4(a) 可以看出,当干扰功率大于信号功率 40dB 以上时,传统的 MUSIC 方法已经无法准确估计出弱信号,而是将强干扰和弱信号均作为期望信号估计出来。由图 4(b)可以看出,修正投影阻塞法有效抑制干扰,实现了对二维微弱信号的角度估计。

仿真 4 不同二维阵型条件下修正投影阻塞法仿真分析

本文构建投影阻塞矩阵的方法与阵型无关,只与干扰个数有关,因此下面的仿真以常见的面阵、十字阵、Y 阵为例分析这几种阵型下信噪比与估计成功概率、估计标准偏差的关系,以方便工程应用中对于不同阵型的选择。阵元数均为 25,假定有三个强干扰和一个弱信号,方位角和俯仰角分别为 $(10^\circ, 30^\circ)$, $(30^\circ, 90^\circ)$, $(65^\circ, 120^\circ)$, $(30^\circ, 60^\circ)$, 干噪比 JNR = 40dB, 信噪比 SNR 从 -20dB 到 20dB。每次仿真运行 300 次 Monte-Carlo 实验。图 5(a) 为不同阵型的估计成功概率同信噪比的关系,图 5(b) 为不同阵型估计标准偏差同信噪比的关系。

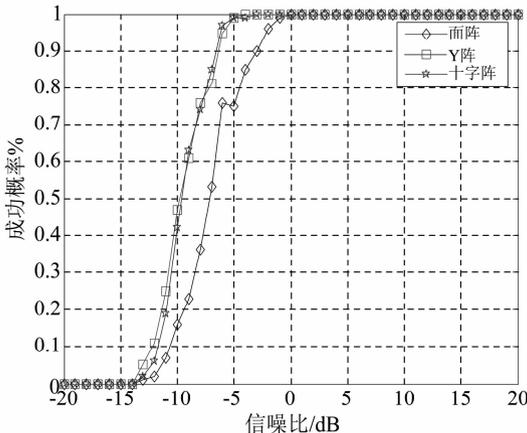


图 5(a) 成功概率同信噪比的关系

Fig. 5(a) the relationship of SNR and success probability

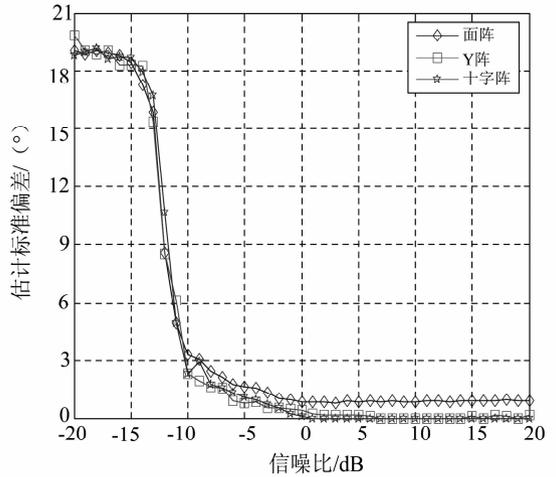


图 5(b) 估计标准偏差同信噪比的关系

Fig. 5(b) the relationship of SNR and estimated standard deviation

估计标准偏差 R 为:

$$R = \sqrt{1/2K \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^P (|\theta_i - \theta_{ik}|^2 + |\varphi_i - \varphi_{ik}|^2)} \tag{17}$$

K 为 Monte-Carlo 实验次数,P 为弱信号个数; θ_i , θ_{ik} 分别为每次试验中第 i 个信号方位角的真实值和估计值, φ_i , φ_{ik} 分别为每次试验中第 i 个信号俯仰角的真实值和估计值。由图 5 可以看出,本文方法可以在不同二维阵型上得以实现,与阵型无关,当信噪比在 0dB 以上时,本文算法可以准确估计出微弱信号。

仿真 5 不同干扰个数条件下仿真实现

信号模型仍为 25 阵元 Y 型阵列,弱信号来波角度为 $(\theta_{s1}, \varphi_{s1}) = (60^\circ, 30^\circ)$; 当干扰个数为 1 个时, $(\theta_{j1}, \varphi_{j1}) = (30^\circ, 80^\circ)$; 当干扰个数为两个时, $(\theta_{j1}, \varphi_{j1}) = (30^\circ, 80^\circ)$, $(\theta_{j2}, \varphi_{j2}) = (90^\circ, 40^\circ)$; 当干扰个数为三个时, $(\theta_{j1}, \varphi_{j1}) = (30^\circ, 80^\circ)$, $(\theta_{j2}, \varphi_{j2}) = (90^\circ, 40^\circ)$, $(\theta_{j3}, \varphi_{j3}) = (120^\circ, 65^\circ)$, 干噪比 JNR = 40dB, 信噪比 SNR 从 -20dB 到 20dB。每次仿真运行 300 次 Monte-Carlo 实验。图 6 为不同干扰个数时估计标准偏差同信噪比的关系。

由图 6 可以看出,在干扰功率大于信号功率 45 dB 时,该算法依然能够很好的抑制干扰并准确估计出弱信号,并且与干扰个数无关。因此有效的解决了传统 MUSIC 算法在干扰功率较大时无法有效估计弱信号的缺陷,克服了传统干扰阻塞法只能用于多阵元、干扰数目标源数比较少 (≤ 3) 的情况^[7]。

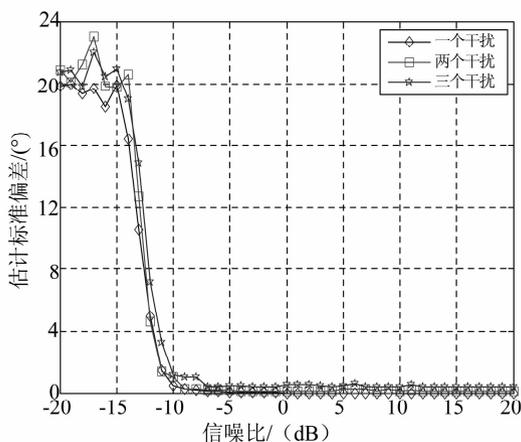


图6 估计标准偏差同信噪比的关系

Fig. 6 the relationship of SNR and estimated standard deviation

5 结束语

本文针对强干扰背景下二维微弱信号角度估计进行了研究,提出了一种无阵型限制的阻塞干扰新方法。实验和仿真结果表明:该方法无需已知干扰角度,适用于面阵、十字阵、Y阵、L阵等多种常见阵型,即使在存在有阵列误差的情况下也能达到较好的估计性能。与传统干扰阻塞法相比,该方法操作简便,省去了因阵型变化导致构建的阻塞矩阵随之改变的麻烦且不损失自由度。

参考文献

[1] 柴立功,罗景青. 一种强干扰条件下微弱信号 DOA 估计的新方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(10): 1517-1520.

Chai Ligong, Luo Jingqing. A Novel Algorithm for Weak Signals' DOA Estimation under Intensive Interferences [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(10): 1517-1520. (in Chinese)

[2] 姚山峰,同武勤,曾安军. 基于正交投影变换的弱信号波达方向估计[J]. 现代雷达, 2011, 33(1): 25-28.

Yao Shanfeng, Tong Wuqin, Zeng Anjun. DOA Estimation of Weak Signal Based on Orthogonal Transform. [J]. Modern Radar, 2011, 33(1): 25-28. (in Chinese)

[3] 苏成晓,罗景青. 一种均匀圆阵子阵干扰抑制 DOA 估计算法[J]. 信号处理, 2010, 26(9): 1355-1360.

Su Cheng xiao, Luo Jing qing. A Novel DOA Estimation Algorithm via Subarray Jamming Suppression Based on Uniform Circular Array. [J]. Signal Processing, 2010, 26(9): 1355-1360. (in Chinese)

[4] 徐亮,曾操,廖桂生,李军. 基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数估计方法[J]. 电子与信息学

报, 2011, 33(2): 321-325.

XU Liang, Zeng Cao, Liao Gui-sheng, Li jun. DOA and Source Number Estimation Method for Strong and Weak Signal Based on Eigen Beamforming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 321-325. (in Chinese)

[5] JIAN L and STOICA P. Efficient mixed Spectrum estimation with applications to target feature extraction[J]. IEEE Transactions on signal Processing, 1996, 44(2): 281-295.

[6] Jian Li, Guo qing Liu, Nan zhi Jiang, P Stoica. Airborne Phased Array Radar: clutter and jamming suppression and moving target detection and feature extraction[A]. IEEE 2000 Sensor Array And Multichannel Signal Processing Workshop[C]: IEEE, 2000. 240-244.

[7] 王姝,何子述,李会勇. 宽带强干扰背景下的弱信号源 DOA 估计方法[J]. 现代雷达, 2006, 28(9): 69-71.

Wang Shu, He Zishu, Li Hui yong. Estimation of DOA for Broadband Weak Signal Source in Broadband Strong Interference Background[J]. Modern Radar, 2006, 28(9): 69-71. (in Chinese)

[8] 陈辉,苏海军. 强干扰/信号背景下的 DOA 估计新方法[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 530-534.

Chen Hui, Su Haijun. A New Approach to Estimate DOA in Presence of Strong Jamming/Signal Suppression [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 530-534. (in Chinese)

[9] 苏成晓,罗景青,解礼. 用阻塞矩阵法实现弱信号二维 DOA 估计[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(18): 153-156.

Su Chengxiao, Luo Jing qing, Xie li. Two-Dimensional DOA Estimation of Weak Signals via Block Matrix [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(18): 153-156. (in Chinese)

[10] 张静,廖桂生. 强信号背景下基于噪声子空间扩充的弱信号 DOA 估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1279-1283.

Zhang jing, Liao Guisheng. DOA Estimation Based on Extended Noise Subspace in the Presence of Strong Signals [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(6): 1279-1283. (in Chinese)

[11] 屈金佑,张剑云. 一种新的强干扰条件下微弱信号 DOA 估计算法[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(5): 61-64.

Qu Jinyou, Zhang Jianyun. A New Method for Weak Signals' DOA Estimation in the Presence of Strong Interferences[J]. Aero-space Electronic Warfare, 2011, 27(5): 61-64. (in Chinese)

[12] 苏成晓,罗景青. 一种强干扰下均匀圆阵弱信号测向新方法[J]. 现代防御技术,2010,38(5):116-120.

Su Chengxiao, Luo Jingqing. Novel DOA Estimation Algorithm for Weak Signals in the Presence of Strong Jamming via UCA[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(5): 116-120. (in Chinese)

作者简介



董 惠(1966-),女,陕西人,毕业于西北工业大学,硕士,副教授,硕士生导师。目前研究方向是:智能网络及智能信息处理。E-mail:donghuiff@163.com



徐婷婷(1989-),女,陕西人,硕士生,目前研究方向是:阵列信号处理。

E-mail:18220809783@163.com



王 纯(1983-),女,陕西人,毕业于西安电子科技大学,博士,讲师。目前研究方向为阵列信号处理, GPS 抗干扰,多目标跟踪等。

E-mail:wangchun01@126.com