

基于斜投影算子的引信抗主瓣干扰方法

张翔, 陈楠祺, 张珂, 王中洋

(机电动态控制重点实验室, 西安 710065)

摘要: **目的** 利用信号极化域信息滤除干扰信号, 解决回波阵列期望信号和主瓣干扰信号的入射角一致导致空域滤波抗干扰失效的问题。**方法** 由于主瓣干扰信号的极化状态通常是未知的, 为此提出基于斜投影的抗主瓣干扰方法。该方法利用极化域-空域联合谱多信号分类算法, 估计主瓣干扰信号的极化状态。然后, 利用期望信号和主瓣干扰信号极化状态的差异, 通过构造斜投影算子, 处理阵列接收数据, 从而滤除主瓣干扰信号。**结果** 当主瓣干扰导向矢量失配, 或者期望信号与主瓣干扰信号的极化状态满足一定程度的差异时, 基于斜投影的抗主瓣干扰方法均取得良好效果。**结论** 基于斜投影的抗主瓣干扰方法具有稳定性好、鲁棒性强等优点, 可应用于雷达、无线电引信等系统对主瓣干扰的抑制, 提升雷达、无线电引信等系统适应复杂电磁环境的能力。

关键词: 滤波; 抗干扰; 主瓣干扰; 极化阵列; 极化域-空域联合谱估计; 斜投影算子

中图分类号: TJ43+4.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0010-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.002

An Anti-mainlobe Jamming Method for Fuzes Based on Oblique Projection

ZHANG Xiang, CHEN Nan-qi, ZHANG Ke, WANG Zhong-yang

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: For the problem that the incidence angle of the expected signal of an antenna array and the mainlobe jamming signal are the same, which leads to the null domain filtering anti-jamming failure, the signal polarization domain information can be used to filter out the jamming, but the polarization state of the mainlobe jamming signal is usually unknown, and for this reason, a polarization array anti-mainlobe jamming method based on oblique projection is proposed. The anti-mainlobe jamming method of polarized array based on oblique projection uses the polarization domain and space domain joint spectral multi-signal classification algorithm to estimate the polarization state of the mainlobe jamming signal. Then, the difference between the polarization state of the desired signal and the mainlobe jamming signal is used to filter out the mainlobe jamming signal by constructing a skew projection operator to process the array received data. The simulation experiments showed that when the mainlobe interference guide vector is mismatched, or when the polarization state of the desired signal and the mainlobe interference signal meet a certain degree of difference, the po-

收稿日期: 2022-09-21; 修订日期: 2022-11-18

Received: 2022-09-21; Revised: 2022-11-18

作者简介: 张翔 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为近感探测、信号处理、电子对抗。

Biography: ZHANG Xiang (1987-), Male, Master, Engineer, Research focus: near field detection, signal processing, electronic countermeasures.

通讯作者: 张珂 (1983—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为近感探测、信号处理、电子对抗。

Corresponding author: ZHANG Ke (1983-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: near field detection, signal processing, electronic countermeasures.

引文格式: 张翔, 陈楠祺, 张珂, 等. 基于斜投影算子的引信抗主瓣干扰方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 010-017.

ZHANG Xiang, CHEN Nan-qi, ZHANG Ke, et al. An Anti-mainlobe Jamming Method for Fuzes Based on Oblique Projection[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 010-017.

larization array mainlobe anti-jamming method based on oblique projection achieves good results. It can be concluded that the anti-mainlobe jamming method of polarization array based on oblique projection achieves good results, with good stability, robustness and other advantages. The method can be applied to radar, radio fuze and other systems to suppress mainlobe interference and improve the ability of radar, radio fuze and other systems to adapt to complex electromagnetic environment.

KEY WORDS: filtering; anti-jamming; mainlobe jamming; polarization array; joint spectrum estimation; oblique projection

随着雷达、无线电引信等装备技术的进步, 电子战已成为现代战争的决胜性因素。其中, 以电子干扰为代表的电子战手段, 对雷达、无线电引信等装备的性能正常发挥及其战场生存构成严重威胁。雷达、无线电引信在突防过程中, 特别是在接近目标时, 难免会受到目标附近干扰机的影响。强电子干扰可能使雷达、无线电引信等系统的探测性能下降, 甚至使系统完全失效。因此, 必须采取有效的对抗措施, 才能确保系统正常工作。

针对雷达、无线电引信等系统受到的主瓣非平稳压制式干扰, 当期望信号和主瓣干扰信号在空域上完全对准时, 空域滤波算法在抑制干扰的同时, 也抑制了大部分的期望信号, 导致输出信噪比 (SINR) 极低, 甚至算法失效。因此, 在信号处理中引入信号的极化域特征, 当期望信号和干扰信号在空域对准时, 利用极化域特征差异滤波, 从而有效改善相控阵列空域滤波的性能, 提高输出 SINR。早期的极化抗干扰, 主要通过改变雷达接收极化抑制干扰功率。文献[1-4]先后提出了自适应极化对消器 (APC)、多凹口逻辑乘积 (MLP) 极化滤波器、多凹口逻辑乘积-自适应极化对消器 (MLP-APC) 和多凹口逻辑乘积-单凹口自适应极化对消器 (MLP-SAPC) 等概念, 用于抑制部分极化的杂波和干扰。然而, 仅凭极化域滤波, 所形成的干扰抑制能力是有限的, 极化抗干扰技术逐渐从单一极化域处理, 向多域联合处理发展。文献[5-7]提出了极化域和空域滤波相结合的思想, 研究了极化敏感阵列 (PSA) 的滤波性能。文献[8]研究了单个矢量传感器最小噪声方差准则波束形成问题。文献[9-10]研究了极化敏感阵列滤波性能的理论分析、量化评估和最佳选择。文献[11-14]研究了完全极化、相关干扰、阵列互耦等条件下, 极化敏感阵列的滤波性能分析和极化敏感阵列信号处理方法。文献[15-16]通过空时极化联合处理, 实现了对干扰信号的抑制。文献[17]提出了基于特征空间的广义波束形成算法 (GEIB)。文献[18-19]将 GEIB 算法推广应用到极化域中, 实现了对干扰信号的抑制, 但是其抑制效果还有进一步提升的空间。文献[20-21]提出了利用斜投影实现极化敏感阵列滤波。文献[22-24]提出了基于斜投影算子极化域滤波的干扰抑制方法。文献[25]研究了极化敏感阵列采用斜投影滤波和正交投影滤波的输出 SINR 特性。文献[26]将斜投影算子应用于多域联

合滤波, 进一步扩展了斜投影的应用范围。

本文在前人研究基础上, 提出一种基于斜投影的抗主瓣干扰方法。首先, 针对干扰信号极化状态未知的情况, 利用极化域-空域联合谱, 估计极化参数, 确定主瓣干扰信号; 然后, 构建斜投影滤波算子, 去除主瓣干扰信号; 最后, 实施自适应波束形成的主瓣干扰抑制。通过仿真实验验证了该方法的优越性和正确性。

1 极化参数估计与斜投影算子构造

1.1 极化域-空域联合谱估计

极化域-空域联合谱是将多信号分类 (MUSIC) 空间谱, 在极化域和空域联合域中推广而得到的, 其基本思想与 MUSIC 空间谱类似。极化敏感阵列接收数据协方差矩阵的信号子空间和噪声子空间相互正交, 利用这 2 种子空间的正交性, 搜索联合谱峰值, 可以得到极化参数的估计值。

假设 YOZ 平面上有 1 个期望信号和 J 个干扰信号入射至极化敏感阵列, 将入射信号个数记为 $K=1+J<N$, 其中, N 表示线性放置的均匀阵列正交偶极子的对数, 阵列结构如图 1 所示。假设这 K 个人射信号在时域和频域上均为窄带信号, 且互不相关。对任一正整数 $k \in [1, K]$, 导向矢量 $\mathbf{a}_k(\theta_k, \varphi_k, \gamma_k, \eta_k)$ 有 4 个参数, 因此极化域-空域联合谱估计是四维空间上的谱估计。该方法所面向的极化敏感阵列为均匀线阵, 不能同时估计 $(\theta_k, \varphi_k, \gamma_k, \eta_k)$ 。为了说明原理, 不失一般性地, 假设极化参数 $\eta_k = \pi/2$ 。因为所有信号在 YOZ 平面内, 所以方位角 $\varphi_k = \pi/2$ 。 η_k 和 φ_k 固定后, 导向矢量可以简化为 $\mathbf{a}_k(\theta_k, \gamma_k)$, 其中 $\theta_k \in [-\pi/2, \pi/2]$, 为入射信号的俯仰角。定义 MUSIC 零谱为阵列扫描波束矢量在噪声子空间上投影长度的平方, 可通过对接收数据的协方差矩阵进行特征分解, 估计 MUSIC 零谱。

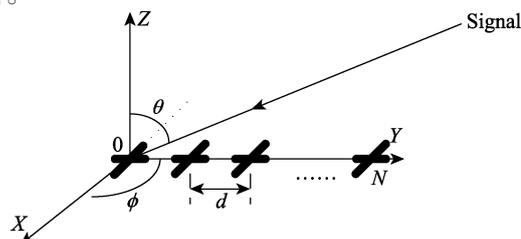


图 1 极化敏感阵列结构

Fig.1 Structure of a polarization sensitive array

在实际处理中,真实的协方差矩阵 \mathbf{R}_x 是未知的,通常利用其最大似然估计值,即采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_x$:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i x_i^H \quad (1)$$

式中: x_i 为阵列采样数据。

$\hat{\mathbf{R}}_x$ 特征分解得到信号子空间 $\hat{\mathbf{E}}_s$ 以及噪声子空间 $\hat{\mathbf{E}}_n$, 因此估计的 MUSIC 零谱为:

$$\hat{Z}_{\text{music}}(\theta, \gamma) = a(\theta, \gamma)^H \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H a(\theta, \gamma) = \|a(\theta, \gamma)\|_F^2 - \sum_{j=K+1}^{2N} |a(\theta, \gamma)^H \hat{\mu}_j|^2 \quad (2)$$

与 MUSIC 空间谱类似,为了方便运用,定义极化域-空域联合谱为 MUSIC 零谱的倒数,即:

$$P_{\text{music}}(\theta, \gamma) = \frac{1}{a(\theta, \gamma)^H \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H a(\theta, \gamma)} = \frac{1}{\|a(\theta, \gamma)\|_F^2 - \sum_{j=K+1}^{2N} |a(\theta, \gamma)^H \hat{\mu}_j|^2} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,极化域-空域联合谱估计中,利用了全部的噪声特征矢量。因此,联合谱在非入射信号处非常光滑,而在信号入射处会有较为尖锐的峰值。通过搜索联合谱峰,即可确定信号的极化状态以及空域状态。联合谱幅度反映的是阵列扫描波束矢量投影长度的平方,并不是真正的入射信号强度。

在得到所有入射信号的空间入射角 θ 以及极化参数 γ 之后,根据干扰信号空间入射角 θ_m 与期望信号空间入射角 θ_s 的接近程度,可以确定主瓣干扰信号。设主瓣宽度为 b_w , 如果干扰信号满足 $|\theta_m - \theta_s| \leq b_w/2$, 则其为主瓣干扰信号,其余为旁瓣干扰信号。主瓣干扰信号参数 $(\theta, \varphi, \gamma, \eta)$ 确定之后,则其阵列导向矢量确定,于是可利用其导向矢量构造斜投影算子处理接收数据。

1.2 斜投影算子构造及自适应波束形成

极化敏感阵列接收信号模型可用式(4)描述。

$$x(t) = a_1 s_1(t) + \sum_{i=2}^K a_i s_i(t) + n(t) \quad (4)$$

式中: $s_1(t)$ 为期望信号的复包络; $s_i(t)$ 为干扰信号的复包络; $n(t)$ 为高斯白噪声。不同的阵列只需要代入相应的导向矢量即可。

极化敏感阵列的接收信号模型,经过极化域-空域联合谱估计之后,不妨将单个主瓣干扰信号设为 $s_2(t)$, 则式(4)可以重新改写为:

$$x(t) = a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t) + \sum_{i=3}^K a_i s_i(t) + n(t) \quad (5)$$

式中: a_1 和 a_2 包含了4个参数 $(\theta, \varphi, \gamma, \eta)$, 因为期望信号和主瓣干扰信号虽然空域波达方向几乎一致,但是极化状态不同,因而易知 $[a_1, a_2]$ 列满秩。意

味着 a_1 张成的信号子空间 $\mathcal{S} = \text{span}\{a_1\}$ 和 a_2 张成的干扰子空间 $\mathcal{I} = \text{span}\{a_2\}$ 无交连,即这2个空间的共同元素只有零向量。但是并不能保证 \mathcal{S} 和 \mathcal{I} 正交。

本文方法的思想是构建从干扰子空间 \mathcal{I} 到信号子空间 \mathcal{S} 的斜投影变换算子 \mathbf{T}_{SI} , 来完全消除主瓣干扰。

利用 \mathbf{T}_{SI} 处理阵列接收信号,有:

$$y(t) = E_{SI} x(t) = \mathbf{T}_{SI} \left(a_1 s_1(t) + a_2 s_2(t) + \sum_{i=3}^K a_i s_i(t) + n(t) \right) = \mathbf{T}_{SI} a_1 s_1(t) + \mathbf{T}_{SI} a_2 s_2(t) + \mathbf{T}_{SI} \left(\sum_{i=3}^K a_i s_i(t) + n(t) \right) \quad (6)$$

对于 $a_1 \in \mathcal{S}$ 、 $a_2 \in \mathcal{I}$, 因为 \mathbf{T}_{SI} 是从干扰子空间 \mathcal{I} 到信号子空间 \mathcal{S} 的斜投影变换算子,因此可得:

$$\mathbf{T}_{SI} a_1 = a_1, \mathbf{T}_{SI} a_2 = 0 \quad (7)$$

因此,式(6)可以化简为:

$$y(t) = \mathbf{T}_{SI} x(t) = a_1 s_1(t) + \mathbf{T}_{SI} \left(\sum_{i=3}^K a_i s_i(t) + n(t) \right) = a_1 s_1(t) + \sum_{i=3}^K \hat{a}_i s_i(t) + \hat{n}(t) \quad (8)$$

式中: $\hat{a}_i = \mathbf{T}_{SI} a_i$, $\hat{n}(t) = \mathbf{T}_{SI} n(t)$ 。严格来说, \hat{a}_i 并不是导向矢量,而是为了形式上统一而假设的变量, $\hat{n}(t)$ 是经过斜投影算子处理过的噪声。

从式(8)可以看出,经过斜投影算子 \mathbf{T}_{SI} 的处理,阵列接收信号中已经完全滤除了主瓣干扰,且期望信号的幅度和相位没有任何变化。注意到处理完的数据中,仍保留了入射信号的极化信息,所以为了去除剩余干扰,可再次进行斜投影算子处理或者采用其他极化滤波方法。当阵列接收信号中存在多个不相干主瓣干扰时,经过第一次斜投影算子处理后的数据如式(8)所示。不妨假设 $s_j(t)$ 为另一个主瓣干扰信号,其对应的阵列导向矢量为 \hat{a}_j , 张成的干扰子空间为 $\hat{\mathcal{I}}$, 再次构造从干扰子空间 $\hat{\mathcal{I}}$ 到信号子空间 \mathcal{S} 的斜投影变换 \mathbf{T}_{SI} 以去除主瓣干扰信号 $s_j(t)$ 。

设 \mathcal{L} 和 \mathcal{M} 都是向量空间 \mathcal{C}^n 的子空间,且 $\mathcal{C}^n = \mathcal{L} \oplus \mathcal{M}$ (\oplus 表示直和), 即任意的 $x \in \mathcal{C}^n$ 都可以唯一地分解为:

$$x = y + z \quad (y \in \mathcal{L}, z \in \mathcal{M}) \quad (9)$$

则称 y 为 x 沿着 \mathcal{M} 到 \mathcal{L} 的投影。

根据式(9)及投影矩阵的意义,沿着干扰子空间 \mathcal{I} 到信号子空间 \mathcal{S} 的斜投影算子的构造方式为:

$$\mathbf{T}_{SI} = [a_1 \quad 0] \begin{bmatrix} a_1^H a_1 & a_1^H a_2 \\ a_2^H a_1 & a_2^H a_2 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} a_1^H \\ a_2^H \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $+$ 表示矩阵的广义逆。容易验证,对于 $a_1 \in \mathcal{S}, a_2 \in \mathcal{I}$, $\mathbf{T}_{SI} a_1 = a_1, \mathbf{T}_{SI} a_2 = 0$ 。

将式(10)进一步展开得到:

$$\mathbf{T}_{SI} = a_1 (a_1^H P_I^{\perp} a_1)^{-1} a_1^H P_I^{\perp} \quad (11)$$

$$P_I^{\perp} = \mathbf{E} - a_2 (a_2^H a_2)^{-1} a_2^H$$

式中: \mathbf{P}_T^\perp 为到干扰子空间的正交补空间的正交投影矩阵; \mathbf{E} 为单位阵。

采用基于特征空间的极化域-空域广义波束形成算法 (SPGEIB), 对式 (8) 进行自适应波束形成, 设式 (8) 的协方差矩阵为 \mathbf{R}_y , 有:

$$\mathbf{R}_y = E\{y(t)y(t)^H\} \quad (12)$$

可得自适应波束形成的权值矢量为:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_1^H \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{a}_1} \quad (13)$$

如果考虑向信号子空间投影, 则对 \mathbf{R}_y 进行特征分解, 可得大特征值对应的特征向量所张成的信号子空间的投影矩阵 $\tilde{\mathbf{T}}_s$, 则:

$$\mathbf{w} = \frac{\tilde{\mathbf{T}}_s \tilde{\mathbf{T}}_s^H \mathbf{w}_{\text{opt}}}{\mathbf{a}_1^H \tilde{\mathbf{T}}_s \tilde{\mathbf{T}}_s^H \mathbf{w}_{\text{opt}}} \quad (14)$$

式 (14) 是在向信号子空间投影的同时保留单位增益约束条件 $\mathbf{a}_1^H \mathbf{w} = 1$ 而得到的权值矢量。因此, 阵列的最终输出为: $z(t) = \mathbf{w}^H y(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{T}_{SI} x(t)$ 。

2 仿真实验和分析

本小节的仿真实验面向极化敏感阵列, 且不考虑非理想因素。仿真实验的内容分为 3 个方面, 首先, 分析对比极化敏感阵列、交替极化阵列 (APA) 和普通阵列等 3 种不同阵列在相同条件下输出 SINR 与输入 SINR 的关系, 以及输出 SINR 随快拍数的收敛情况。其次, 针对干扰角和极化状态未知的情况, 利用极化域-空域联合谱估计主瓣干扰信号的状态参数, 当存在估计误差时, 分析此时基于斜投影的主瓣干扰抑制方法输出 SINR 的变化情况。最后, 分析干扰的俯仰角和极化参量对基于斜投影的抗主瓣干扰方法的输出 SINR 的影响, 并与文献[18-19]作比较分析。

2.1 3 种阵列的性能比较分析

假设极化敏感阵列的阵元为 8 对正交偶极子, 如图 1 所示。交替极化阵列的阵元为 8 对分别沿 X 轴和 Y 轴放置的偶极子, 如图 2 所示。普通阵列为具有 8 个各向同性的天线接收单元的均匀线阵, 阵元间隔均为 1/2 波长。

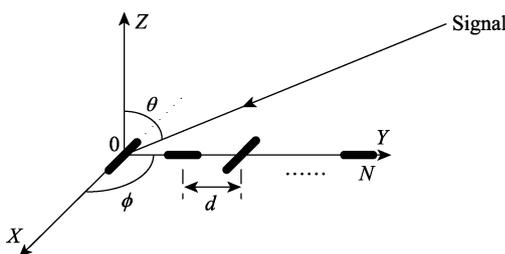
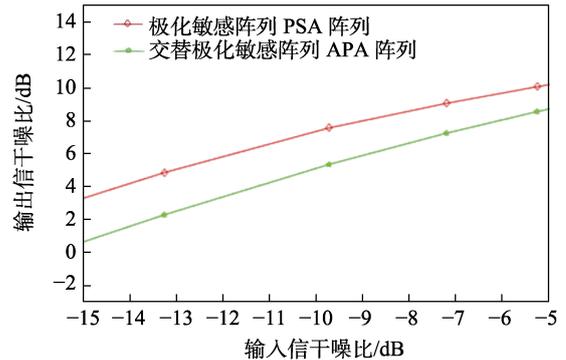
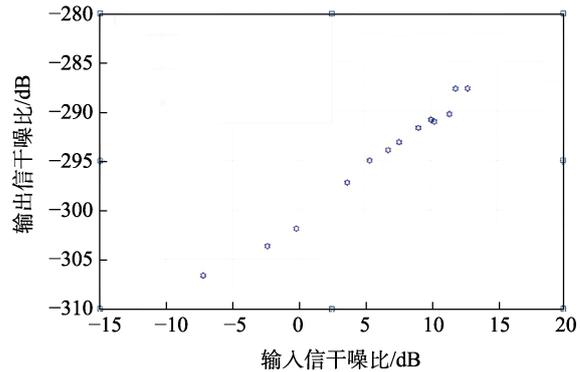


图 2 交替极化阵列结构
Fig.2 Structure of an alternate polarization array

入射期望信号的参数 $(\theta, \varphi, \gamma, \eta)$ 中俯仰角 θ_1 为 20° , 方位角 φ_1 为 90° , 极化参数 γ_1 和 η_1 分别为 45° 和 180° 。入射的主瓣干扰信号的俯仰角 θ_2 为 20° , 方位角 φ_2 为 90° , 极化参数 γ_2 和 η_2 分别为 5° 和 10° 。类似地, 2 个旁瓣干扰的参数分别为 $(50^\circ, 90^\circ, 85^\circ, 100^\circ)$ 和 $(-10^\circ, 90^\circ, 65^\circ, 140^\circ)$, 噪声均假设为高斯白噪声。改变输入 SINR, 3 种阵列的输出 SINR 如图 3 所示。每组数据均由 100 次蒙特卡洛实验得到。



a 极化敏感阵列和交替极化阵列输出 SINR



b 普通阵列输出 SINR

图 3 相同条件下 3 种阵列输出 SINR 随输入 SINR 的关系
Fig.3 The relationship between output SINR and input SINR for three arrays under the same conditions: a) SINR output from a PSA and an APA; b) SINR output from a normal array

对比图 3a、b, 可以得出如下结论: 相同条件下, 极化敏感阵列、交替极化阵列能够利用信号空域和极化域的信息滤波, 滤波性能明显优于只能利用空域信息滤波的普通阵列。因为交替极化阵列正交偶极子的个数为极化敏感阵列的 1/2, 所以阵列性能不及极化敏感阵列, 其输出 SINR 大约有 2 dB 的差距, 说明交替极化阵列以略微牺牲极化阵列的滤波性能换取系统复杂度的减半。普通阵列面对在空域上和期望信号对准的主瓣干扰无能为力, 而极化敏感阵列则仍能滤除此种主瓣干扰。

给定输入 SINR 为 -12 dB, 极化敏感阵列和交替极化阵列的输出 SINR 随快拍数的收敛情况如图 4 所示。可以看出, 极化敏感阵列和交替极化阵列的输出 SINR 的收敛情况类似。因为交替极化阵列可以看作是一种特殊的极化敏感阵列, 所以收敛速度基本一

致,但是极化敏感阵列最终的输出 SINR 要比交替极化阵列略高 2.5 dB 左右,这也和前面的理论分析一致。

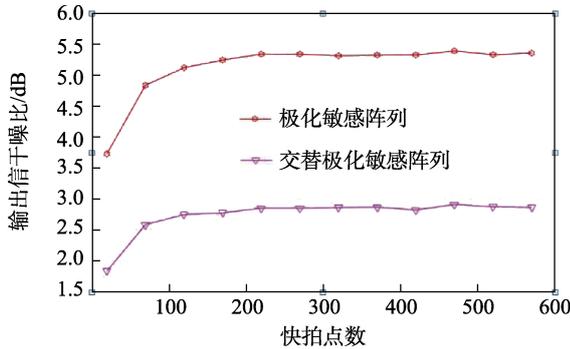


图4 给定输入 SINR 为 -12dB 时阵列输出的收敛关系
Fig.4 Convergence of the arrays for a given input SINR of -12dB

2.2 极化域-空域联合谱估计仿真

本小节仿真实验面向极化敏感阵列且不考虑非理想因素的影响,假设入射期望信号和 3 个干扰信号(包含 1 个主瓣干扰信号和 2 个旁瓣干扰信号)的参数 (θ, γ) 分别为 $(0^\circ, 65^\circ)$ 、 $(1^\circ, 1^\circ)$ 、 $(50^\circ, 85^\circ)$ 、 $(-60^\circ, 25^\circ)$ 。方位角 φ 均为 90° ,极化参数 η 均为 180° 。噪声均为高斯白噪声,且输入 SINR 为 -10 dB,则极化域-空域联合谱估计仿真如图 5 所示。

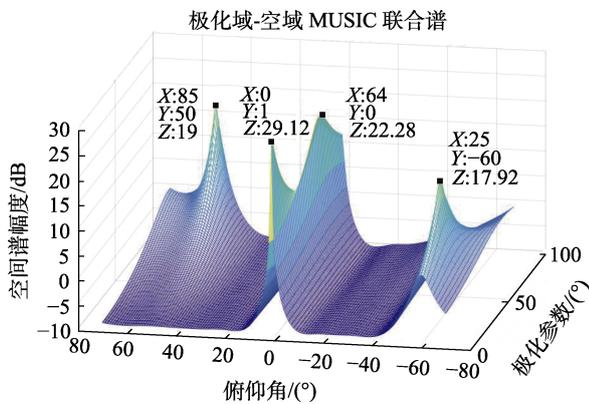


图5 极化域-空域联合谱估计仿真
Fig.5 Simulation of the joint spectrum in polarizational and spatial domains

从图 5 可以看出,所有 4 个入射信号在联合谱中均能清晰呈现,谱线光滑,且在入射信号处有尖锐峰值,谱峰检测概率较大。由前面对联合谱的分析可知,极化域-空域联合谱是定义在四维空间 $(\theta, \varphi, \gamma, \eta)$ 上的,其分辨率应当远远高于在二维空间 (θ, γ) 上的谱估计分辨率。从峰值点可以看出,4 个入射信号参数估计相当准确,通过检测谱峰即可确定对应的俯仰角 θ 和极化参数 γ 。不妨假设主瓣宽度 $b_w=3^\circ$,根据期望信号的俯仰角为 0° ,则在主瓣区间 $\theta \in [-1.5^\circ, 1.5^\circ]$ 内的干扰信号均为主瓣干扰。由图 6 可知,主瓣干扰的估计参数 $(\tilde{\theta}, \tilde{\gamma})$ 为 $(1^\circ, 0^\circ)$ 。

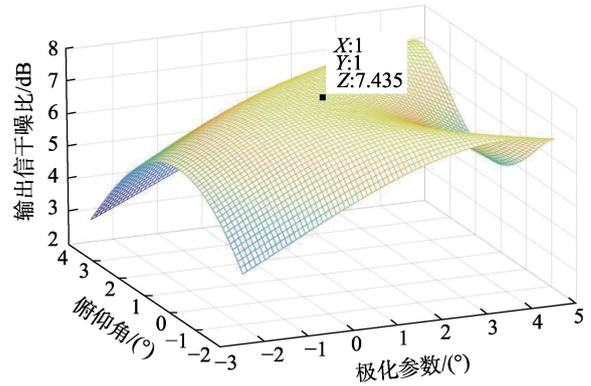


图6 主瓣干扰导向矢量失配时的输出 SINR
Fig.6 Output SINR when the mainlobe interference guidance vector is mismatched

从图 6 可以看出,当极化域-空域联合谱估计主瓣干扰的参数误差区间为俯仰角 $\tilde{\theta} \in (-2^\circ, 4^\circ)$,极化参数 $\tilde{\gamma} \in (-2^\circ, 4^\circ)$ 时,即意味着主瓣干扰的导向矢量与真实导向矢量存在微小的误差,此时基于斜投影的抗主瓣干扰方法的输出 SINR 如图 6 所示。 $(\tilde{\theta}, \tilde{\gamma})$ 越接近 $(1^\circ, 1^\circ)$,则输出 SINR 越高,且在位置 $(1^\circ, 1^\circ)$ 处的曲面中心曲率较大,而不是高耸的峰值点。这意味着即使存在一定误差,主瓣干扰依然能得到较为充分的抑制,且曲面整体覆盖的输出 SINR 范围为 $(4$ dB, 7 dB),说明该方法的稳定性较好,系统鲁棒性较强。

2.3 入射信号的俯仰角及极化参量对输出 SINR 的影响

本小节仿真实验面向极化敏感阵列且不考虑非理想因素的影响,期望信号的空域参数和极化参数 $(\theta_1, \varphi_1, \gamma_1, \eta_1)$ 为 $(0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 180^\circ)$,2 个旁瓣干扰信号参数分别为 $(50^\circ, 90^\circ, 85^\circ, 180^\circ)$ 和 $(-60^\circ, 90^\circ, 25^\circ, 60^\circ)$ 。设主瓣干扰信号参数为 $(\theta_2, \varphi_2, \gamma_2, \eta_2)$,其中方位角参数 $\varphi_2=90^\circ$ 。

1) 仿真实验一。固定主瓣干扰的极化参数 $\eta_2=180^\circ$,3 种方法的输出 SINR 随主瓣干扰角度 θ_2 在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 和极化参数 γ_2 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间隔 15° 的变化情况如图 7 所示。

由图 7 对比可知,当干扰俯仰角在主瓣宽度以外时,3 种方法均有较好的效果,此时空域滤波效果良好,阵列仅靠空域能力就能滤除干扰,极化信息的作用不明显。提出的基于斜投影的抗主瓣干扰方法对位于主瓣宽度以外的旁瓣干扰依然能够有效抑制,阵列输出 SINR 高于文献[18-19]中的方法,显示出良好的优越性和鲁棒性。

从图 7c 可以看出,当主瓣干扰俯仰角 θ_2 、极化参数 γ_2 和期望信号俯仰角 θ_1 和极化参数 γ_1 一致时,建立的方法输出 SINR 陡降。这是因为此时期望信号和主瓣干扰信号的极化域-空域导向矢量完全相同,斜投影算子在滤除主瓣干扰信号的同时,也剔除了期望

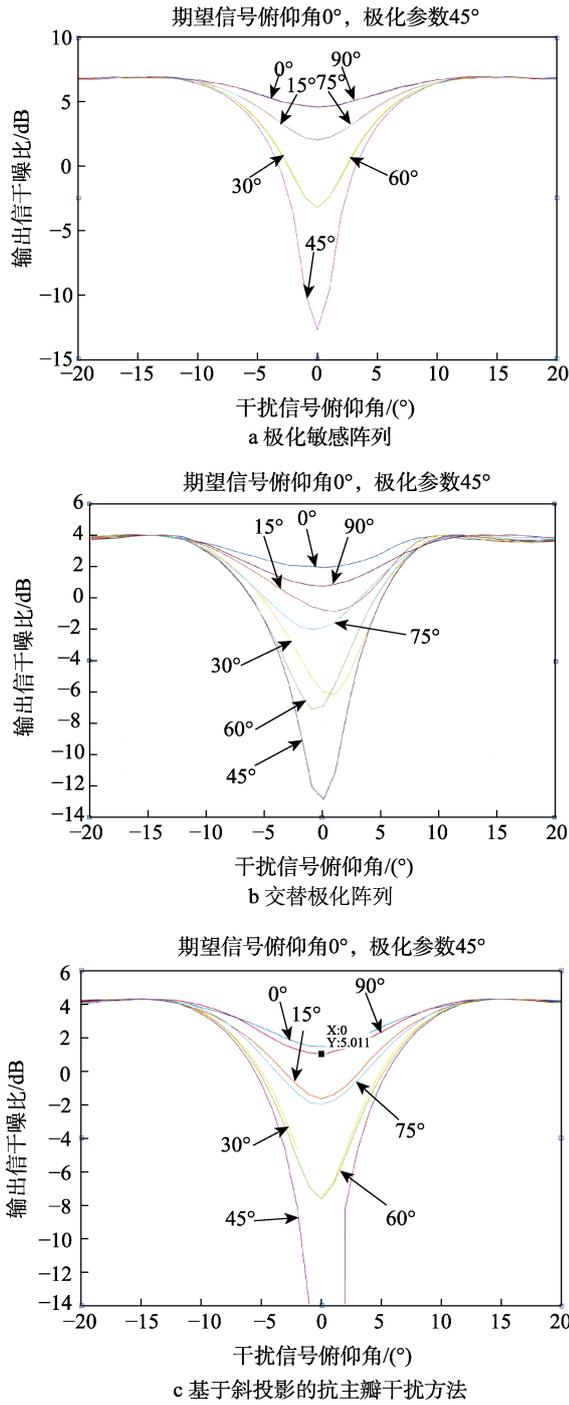


图 7 仿真实验一中 3 种方法的输出 SINR

Fig.7 The SINR output from the three methods in simulation experiment I : a) PSA; b)APA; c)Anti-mainlobe jamming method

信号, 因此输出 SINR 极低, 斜投影算子失效。事实上, 当期望信号和干扰信号在空域入射对准, 通过引入信号的极化域信息来滤除主瓣干扰信号的前提是主瓣干扰信号和期望信号的极化状态不一致。建立方法的初衷也是当期望信号和主瓣干扰信号极化状态存在差异时, 尽可能提高输出 SINR。对比图 7a、b、c 可以看出, 只要保证期望信号和主瓣干扰信号极化参数满足 $|\gamma_2 - \gamma_1| \geq 20^\circ$, 则建立的基于斜投影算

子的抗主瓣干扰方法就能获得明显优于其他 2 种方法的输出 SINR。

2) 仿真实验二。固定主瓣干扰的极化参数 $\gamma_2=45^\circ$, 3 种方法的输出 SINR 随主瓣干扰角度 θ_2 在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 和极化参数 η_2 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间隔 60° 的变化情况如图 8 所示。

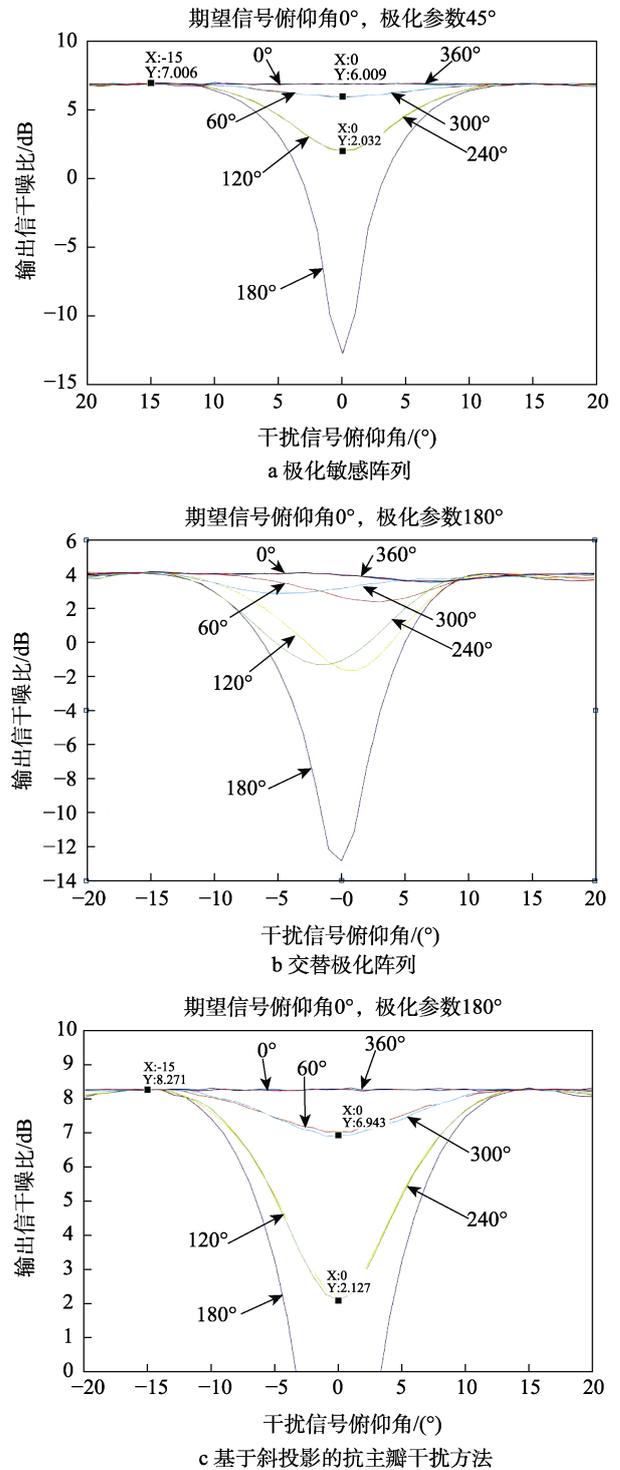


图 8 仿真实验二中 3 种方法的输出 SINR 变化情况

Fig.8 The SINR output from the three methods in simulation experiment II : a) PSA; b)APA; c)Anti-mainlobe jamming method

从图8可以看出,当期望信号和干扰信号的极化参数满足 $\gamma_1=\gamma_2$ 时,极化参数 η 的变化对输出SINR的影响和 γ 对输出SINR的影响类似。期望信号的俯仰角为 0° ,极化参数 $\gamma_1=180^\circ$,在干扰俯仰角对准期望信号的俯仰角时,两者的极化状态参数 η 越接近,输出SINR越小。这是因为两者的极化状态越接近,极化敏感阵列的极化域滤波能力就越弱。当期望信号和主瓣干扰信号的极化参数满足 $|\eta_2 - \eta_1| \geq 60^\circ$ 时,建立的方法即可获得优于其他2种方法的输出SINR。

综上所述,当期望信号和主瓣干扰信号在空域对准时,利用信号的极化域状态差异能获得良好的滤波效果。当两者的极化状态满足一定程度的差异时,提出的基于斜投影算子的抗主瓣干扰方法能够取得优异的效果,性能明显优于文献[18-19]中的方法,并显示出良好的优越性和鲁棒性。

3 结语

针对主瓣干扰信号极化状态未知的情况,通过极化域-空域联合谱估计极化参数,确定主瓣干扰信号,再构建斜投影滤波算子去除主瓣干扰信号,最后进行自适应波束形成。通过仿真验证了该方法的优越性和正确性,可以应用于雷达、无线电引信等系统对主瓣干扰的抑制,提升雷达、无线电引信等系统适应复杂电磁环境的能力。

参考文献:

- [1] NATHANSON F E. Adaptive Circular Polarization[C]//IEEE International Radar Conference. Arlington: IEEE, 1975.
- [2] POELMAN A J, GUY J R F. Multinotch Logic-Product Polarisation Suppression Filters: A Typical Design Example and Its Performance in a Rain Clutter Environment[J]. IEEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing, 1984, 131(4): 383.
- [3] GIULI D, FOSSI M, GHERARDELLI M. A Technique for Adaptive Polarization Filtering in Radars[C]//Proceedings of IEEE International Radar Conference. Arlington: IEEE, 1985.
- [4] GHERARDELLI M, GIULI D, FOSSI M. Suboptimum Adaptive Polarisation Cancellers for Dual-Polarisation Radars[J]. IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing, 1988, 135(1): 60.
- [5] COMPTON R. On the Performance of a Polarization Sensitive Adaptive Array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(5): 718-725.
- [6] COMPTON R. The Tripole Antenna: An Adaptive Array with Full Polarization Flexibility[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(6): 944-952.
- [7] COMPTON R. The Performance of a Tripole Adaptive Array Against Cross-Polarized Jamming[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1983, 31(4): 682-685.
- [8] NEHORAI A, HO K C, TAN B T G. Minimum-Noise-Variance Beamformer with an Electromagnetic Vector Sensor[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(3): 601-618.
- [9] 王雪松, 代大海, 徐振海, 肖顺平, 庄钊文. 极化滤波器的性能评估与选择[J]. 自然科学进展, 2004, 14(4): 442-448.
WANG Xue-song, DAI Da-hai, XU Zhen-hai, et al. Performance Evaluation and Selection of Polarization Filter[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(4): 442-448.
- [10] 王雪松, 汪连栋, 肖顺平, 庄钊文. 自适应极化滤波器的理论性能分析[J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1326-1329.
WANG Xue-song, WANG Lian-dong, XIAO Shun-ping, et al. Theoretical Performance Analysis of Adaptive Polarization Filters[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1326-1329.
- [11] 徐振海, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文. 极化敏感阵列滤波性能分析: 完全极化情形[J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1310-1313.
XU Zhen-hai, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, et al. Filtering Performance of Polarization Sensitive Array: Completely Polarized Case[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1310-1313.
- [12] 徐振海, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文. 极化敏感阵列滤波性能分析: 相关干扰情形[J]. 通信学报, 2004, 25(10): 8-15.
XU Zhen-hai, WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, et al. Filtering Performance of Polarization Sensitive Array: Correlated Interference Case[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(10): 8-15.
- [13] 刘勇, 徐振海, 肖顺平. 阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2303-2306.
LIU Yong, XU Zhen-hai, XIAO Shun-ping. The Effect of Array Mutual Coupling on Filtering Performance of Polarization Sensitive Array[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2303-2306.
- [14] 庄钊文. 极化敏感阵列信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
ZHUANG Zhao-wen. Signal Processing of Polarization Sensitive Array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [15] 夏德平, 张良, 吴涛, 等. 机载双基地极化敏感阵列多干扰抑制[J]. 雷达学报, 2022, 11(3): 399-407.
XIA De-ping, ZHANG Liang, WU Tao, et al. A Multiple Interference Suppression Algorithm Based on Airborne Bistatic Polarization Radar[J]. Journal of Radars, 2022, 11(3): 399-407.
- [16] 金鸣, 吕婷婷, 周曼丽, 等. 基于LCMV准则的空时极化联合抗干扰算法[J]. 无线电工程, 2022, 52(8): 1434-1440.
JIN Ming, LYU Ting-ting, ZHOU Man-li, et al. Joint Anti-Jamming Algorithm for Space-Time Polarization Based

- Based on LCMV Criterion[J]. Radio Engineering, 2022, 52(8): 1434-1440.
- [17] YU J L, YE H C C. Generalized Eigenspace-Based Beamformers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(11): 2453-2461.
- [18] 郭玉华, 常青美, 余道杰, 等. 一种改进的极化域-空域联合的自适应波束形成算法[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1279-1283.
- GUO Yu-hua, CHANG Qing-mei, YU Dao-jie, et al. An Improved Polarization-Space Adaptive Beamforming Algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1279-1283.
- [19] 罗章凯, 王华力, 张翼鹏, 等. 极化阵列抗主瓣干扰性能研究[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 504-509.
- LUO Zhang-kai, WANG Hua-li, ZHANG Yi-peng, et al. Mainlobe Anti-Jamming Performance of the Polarization Sensitive Array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 504-509.
- [20] MAO X P, LIU A J, HOU H J, et al. Oblique Projection Polarisation Filtering for Interference Suppression in High-Frequency Surface Wave Radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2012, 6(2): 71-80.
- [21] 毛兴鹏, 刘爱军, 邓维波, 等. 斜投影极化滤波器[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2003-2008.
- MAO Xing-peng, LIU Ai-jun, DENG Wei-bo, et al. An Oblique Projecting Polarization Filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2003-2008.
- [22] CAO Bin, YU Jia, WANG Ye, et al. Enabling Polarisation Filtering in Wireless Communications: Models, Algorithms and Characteristics[J]. IET Communications, 2013, 7(3): 247-254.
- [23] 张钦宇, 曹斌, 王健, 等. 基于斜投影的极化滤波技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(1): 91-101.
- ZHANG Qin-yu, CAO Bin, WANG Jian, et al. Polarization Filtering Technology Based on Oblique Projection[J]. Scientia Sinica Informations, 2010, 40(1): 91-101.
- [24] CAO B, ZHANG Q Y, LIANG D, et al. Blind Adaptive Polarization Filtering Based on Oblique Projection[C]// 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town: IEEE, 2010.
- [25] 田静, 廖桂生, 杨志伟. 极化敏感阵列斜投影滤波性能分析[J]. 雷达学报, 2013, 2(3): 284-291.
- TIAN Jing, LIAO Gui-sheng, YANG Zhi-wei. Performance Analysis of Oblique Projection Filtering Based on Polarization Sensitive Array[J]. Journal of Radars, 2013, 2(3): 284-291.
- [26] 杨书宁, 杨仲平, 张剑云, 等. 基于稀疏重构的空域-极化域联合抗主瓣干扰方法[J]. 信号处理, 2022, 38(2): 401-409.
- YANG Shu-ning, YANG Zhong-ping, ZHANG Jian-yun, et al. Space-Polarization Domain Combined Anti-Mainlobe Jamming Method Based on Sparse Reconstruction[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(2): 401-409.

责任编辑: 刘世忠