

基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法

郝文涛¹, 张 群¹, 何 丽², 罗 迎¹, 李汪洋¹, 田泰方¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 空军电磁频谱管理中心, 北京, 100843)

摘要 当主瓣干扰功率较大时, 基于特征投影预处理(EPB)的自适应波束形成算法抑制旁瓣干扰的能力大大下降甚至无法有效抑制, 因此, 在 EPB 算法的基础上提出了基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法。首先将特征投影预处理后的数据向去除了主瓣干扰的干扰信号子空间上投影, 对得到的数据进行适当的加权, 再加入到特征投影预处理后的数据上, 以加强旁瓣干扰信号功率; 其次利用干扰加强后的采样信号形成新的协方差矩阵, 并计算其自适应权矢量; 最后利用求得的自适应权矢量获得阵列输出, 并对该算法的信噪比进行了简要分析。仿真结果表明, 当主瓣干扰功率较高时, 该算法能够在旁瓣干扰方向上形成较深的零陷, 具有更好的旁瓣抑制效果。

关键词 自适应波束形成; 主瓣干扰; 特征投影; 深零陷

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.010

中图分类号 TN911.7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0054-06

Mainlobe Jamming Suppression Algorithm Based on Eigen-projection Preprocessing and Augment of Null Depth

HAO Wentao¹, ZHANG Qun¹, HE Li², LUO Ying¹, LI Wangyang¹, TIAN Taifang¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. The Center of Air Force Electromagnetic Spectrum Management, Beijing, 100834)

Abstract: When there is main-lobe interference, the adaptive beam-forming based on eigen-projection preprocessing (EPB) can effectively suppress the main-lobe interference and side-lobe interference. However, when the power of main-lobe interference becomes stronger, the ability of the algorithm to suppress side-lobe interference is greatly decreased, and the side-lobe interference fails to be suppressed effectively. In accordance with EPB, an algorithm based on eigen-projection preprocessing and augment of null depth is proposed in this paper. Firstly, the eigen-projected data is projected on the interference signal subspace which removes the main lobe interference. Secondly, the data after projection is weighted appropriately and then added to the data after eigen-projection preprocessing to enhance the power of the side-lobe interference signal. Thirdly, the output of the modified weight vector can be calculated by the new covariance matrix which is formed by the sampled data after interference enhancement. Fourthly, the output of the adaptive beam-forming can be calculated by the modified weight vector, and the signal to interference plus noise ratio of the algorithm is analyzed briefly. The simulation results show that the proposed algorithm in

收稿日期: 2017-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61631019)

作者简介: 郝文涛(1995—), 男, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事抗干扰研究. E-mail: haowt_aj308@163.com

引用格式: 郝文涛, 张群, 何丽, 等. 基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 54-59. HAO Wentao, ZHANG Qun, HE Li, et al. Mainlobe Jamming Suppression Algorithm Based on Eigen-projection Preprocessing and Augment of Null Depth [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 54-59.

this paper can form deeper nulls in the direction of side-lobe interference, and obtain still greater side-lobe suppression effect in the case of higher power of the main-lobe interference.

Key words: adaptive beam-forming; main-lobe interference; eigen-projection; null depth

自适应波束形成是空间信号处理中抑制强干扰信号、增强有用信号的有效方法,能够对快速变化的信号环境实现自适应的干扰抑制,极大地提高雷达、通信、声纳等电子系统的抗干扰性能。传统的自适应波束形成算法对从旁瓣进入的干扰信号^[1]具有良好的抑制效果,然而,当干扰从主瓣进入时,常见的各种自适应波束形成算法均会在主瓣干扰位置处形成较深的零陷,致使主波束指向偏移并发生畸变、旁瓣电平明显升高,从而严重影响测角的精度^[2-3]。

近年来一些学者也对主瓣干扰问题进行了深入的研究^[4-6]。其中针对主瓣干扰条件下主波束指向偏移并发生畸变、旁瓣电平明显升高等问题,文献^[7~8]提出了基于阻塞矩阵预处理(Blocking Matrix Preprocessing, BMB)的自适应波束形成算法,但是 BMB 算法会降低阵元的自由度且需要准确知道主瓣干扰的来向,这在实际中是很难达到的。针对 BMB 算法的问题,文献^[9]提出了基于特征投影预处理(Eigen-projection Matrix Preprocessing, EPB)的自适应波束形成算法,该算法既不会降低阵元的自由度也不需要准确知道主瓣干扰的来向,但是当主旁瓣干扰同时存在且主瓣干扰功率较大时,该算法抑制旁瓣干扰的效果就会大大降低甚至失效。

因此本文在 EPB 算法的基础上提出了基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法。

1 信号模型

考虑等间距排列的 M 元窄带阵列,阵列间距 $d = l/2$, l 为入射信号的波长,1 个期望信号和 P 个远场干扰信号入射到阵列上,期望信号方向为 θ_0 ,干扰信号方向为 θ_i , $i = 1, 2, \dots, P$,则阵列天线在 t 时刻接收到的快拍数据可表示为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) = \mathbf{a}(\theta_0)s_0(t) + \sum_{i=1}^P \mathbf{a}(\theta_i)s_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ 为接收信号; \mathbf{A} 为阵列流形矩阵, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_0), \mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)]$; $\mathbf{S}(t) = [s_0(t), s_1(t), \dots, s_P(t)]^T$ 为入射的 $P+1$ 个信号源; $\mathbf{n}(t)$ 为通道噪声; $s_i(t)$ ($i = 0, 1, \dots, P$) 为入射信号的复包络; $\mathbf{a}(\theta_i)$ ($i = 0, 1, \dots, P$) 为各个入射信号的导向矢量。

假设训练样本中只含有干扰和噪声信号,即:

$$\mathbf{X}_{i+n}(t) = \mathbf{A}_{i+n}\mathbf{S}_{i+n}(t) + \mathbf{n}(t) = \sum_{i=1}^P \mathbf{a}(\theta_i)s_i(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

则其干扰噪声协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{i+n} = E[\mathbf{X}_{i+n}(t)\mathbf{X}_{i+n}^H(t)] = \mathbf{A}_{i+n}\mathbf{R}_i\mathbf{A}_{i+n}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}_i 为干扰协方差矩阵,根据线性约束最小方差准则(LCMV),解得最佳自适应权矢量为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu\mathbf{R}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_0) \quad (4)$$

式中: θ_0 为波束方向; $\mu = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_0)\mathbf{R}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_0)}$; $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为 $M \times 1$ 维静态波束导向矢量。

最佳波束形成器在第 P 个干扰方向上的波束响应是:

$$\mathbf{C}(\theta_P) = \mathbf{W}_{\text{opt}}^H\mathbf{a}(\theta_P) = \mu\mathbf{a}^H(\theta_0)\mathbf{R}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_P) \quad (5)$$

通过计算可以推出^[10]:

$$\mathbf{C}(\theta_P) = \mu\mathbf{a}^H(\theta_0)\mathbf{R}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_P) = \frac{\mathbf{a}(\theta_0)\mathbf{Q}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_P)}{\mathbf{a}^H(\theta_0)\mathbf{R}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_0)} \frac{1}{1 + M\sigma_n^2\mathbf{a}^H(\theta_P)\mathbf{Q}_{i+n}^{-1}\mathbf{a}(\theta_P)} \quad (6)$$

式中:第 1 项是不存在第 P 个干扰时,在角度 θ_P 上的波束响应;第 2 项与第 P 个干扰有关,它决定着干扰方向 θ_P 上零陷的深度。显然,零陷的深度与干扰的功率大小有关,干扰越强,最佳波束形成器在 θ_P 上的零陷深度越深。

2 基于特征投影预处理(EPB)的自适应波束形成算法

针对常规波束形成算法无法有效解决干扰从主波束进入的问题,文献^[9]提出了 EPB 算法。EPB 算法的优势在于它既不损失阵列单元的自由度,也不需要估计主瓣干扰的来向。该算法的处理流程为:

首先,对不含期望信号的协方差矩阵 \mathbf{R}_{i+n} 进行特征分解^[11-12]:

$$\mathbf{R}_{i+n} = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H \quad (7)$$

式中: λ_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 是按从大到小顺序排列的 M 个特征值, \mathbf{u}_i ($i = 1, 2, \dots, M$) 为与特征值对应的特征矢量,且 \mathbf{U}_s 和 \mathbf{U}_n 相互正交,并分别扩张成对应于协方差矩阵的干扰子空间和噪声子空间。

方向图、噪声干扰协方差矩阵的特征值以及干扰特征波束存在以下联系^[13]:

$$\mathbf{G}_a(\theta) = \mathbf{G}_q(\theta) - \sum_{m=1}^M \frac{\lambda_m - \lambda_{\min}}{\lambda_m} (\mathbf{a}(\theta_0)^H \mathbf{u}_m) \mathbf{G}_m(\theta) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{G}_a(\theta)$ 为阵列的自适应方向图; $\mathbf{G}_q(\theta)$ 为阵列的静态方向图; λ_{\min} 为噪声对应的最小特征值; $\mathbf{G}_m(\theta)$ 为与 P 个干扰相对应的 P 个特征波束, 由于特征矢量对应于导向矢量, 所以第 m 个干扰对应的特征波束峰值的方向正好在第 m 个干扰的方向, 而在其他干扰方位上波束响应为零。因此, 可通过式(9)来判断主瓣干扰所对应的特征矢量^[14]:

$$|\mathbf{u}_m^H \mathbf{a}(\theta_0)|^2 \geq \rho |\mathbf{a}(\theta_0)|^2 \quad (9)$$

式中: ρ 为一合适的常数因子。当存在 N 个主瓣干扰时可取 $|\mathbf{u}_m^H \mathbf{a}(\theta_0)|^2$ 的 N 个最大值所对应的 N 个特征矢量^[15]。本文仅考虑存在一个主瓣干扰时的情形。

通过式(9)判断出主瓣干扰对应的特征矢量(假设为 \mathbf{u}_m)后, 构造特征投影矩阵:

$$\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{u}_m (\mathbf{u}_m^H \mathbf{u}_m)^{-1} \mathbf{u}_m^H \quad (10)$$

将阵列初始数据与特征投影矩阵相乘, 可有效地去除主瓣干扰。设处理后的信号为 $\mathbf{Y}(t)$, 即:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{B}\mathbf{X}(t) \quad (11)$$

则特征投影预处理变换后的数据协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_Y = E[\mathbf{Y}(t)\mathbf{Y}^H(t)] = \mathbf{B}\mathbf{R}_X\mathbf{B}^H + \sigma_n^2\mathbf{B}\mathbf{B}^H \quad (12)$$

与式(4)类似, 可得到最优自适应权矢量为:

$$\mathbf{w} = \mu' \mathbf{R}_Y^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) \quad (13)$$

式中: μ' 为常数; $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为静态导向矢量。

显然, 上述算法能有效消除主瓣干扰引起的旁瓣升高、主波束畸变等问题, 但并没能有效解决主波束偏移的问题。因此, 本文采用对角加载技术来改善波束的指向性能。

对角加载^[16]就是给数据协方差矩阵增加一个对角矩阵, 即:

$$\bar{\mathbf{R}}_Y = \mathbf{R}_Y + \delta_L^2 \mathbf{I} \quad (14)$$

式中: δ_L^2 为加载电平, 用来控制加载量。

在自适应阵列信号处理中, 为了获得较好的波束指向性能, 根据信号处理的经验, 一般选择加载电平高于背景噪声的 5~10 dB^[17]。最后, 求得自适应权系数为:

$$\mathbf{W}_{\text{EPB}} = \mu'' \bar{\mathbf{R}}_Y^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) \quad (15)$$

3 基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法

基于特征投影预处理(EPB)的自适应波束形成算法可以很好地解决副瓣电平增高、主波束变形的问题。但是, 当主瓣干扰干扰比较高时, 该算法抑制旁瓣干扰的能力大大下降甚至无法有效抑制。针对上述问题, 本文提出基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法, 具体算法流程见图 1。



图 1 所提算法的处理框图

Fig. 1 Processing block diagram of proposed method

根据式(7)将干扰噪声协方差矩阵进行特征分解, 得到从大到小顺序排列的 M 个特征值及其所对应的特征矢量。通过式(9)判断出主瓣干扰所对应的特征矢量后(假设为 \mathbf{u}_1), 再根据式(10)构造特征投影矩阵, 将接收信号与特征投影矩阵相乘, 根据式(11)得到预处理后的信号。

根据式(6)可得零陷的深度由干扰功率 $M\sigma_p^2$ 决定。干扰信号的功率越强, 其在最佳波束形成器上形成的零陷深度越深。因此, 将干扰分量提取出来并做一定程度的加强, 即可实现零陷加深^[18]。

在理想情况下, 信号子空间和噪声子空间是正交的, 利用式(16), 将预处理后的信号 $\mathbf{Y}(t)$ 向去除了主瓣干扰的旁瓣干扰信号子空间投影, 可以得到摒弃了噪声和主瓣干扰的旁瓣干扰信号。

$$\mathbf{P}\mathbf{Y}(t) = \mathbf{A}_1\mathbf{S}_1(t) \quad (16)$$

式中: \mathbf{P} 是在去除了主瓣干扰的干扰信号子空间的投影矩阵:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_1(\mathbf{A}_1^H\mathbf{A}_1)^{-1}\mathbf{A}_1^H \quad (17)$$

式中: $\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$ 为去除了主瓣干扰信号后的阵列流形(假设主瓣干扰的角度为 θ_1); $\mathbf{S}_1(t) = [s_2(t), \dots, s_p(t)]^T$ 为旁瓣干扰信号矢量。将式(16)得到的投影信号乘以权重 g , 并加到特征投影预处理后的信号上, 得到式(18):

$$\mathbf{Y}_1(t) = \mathbf{Y}(t) + g\mathbf{P}\mathbf{Y}(t) = (\mathbf{I} + g\mathbf{P})\mathbf{Y}(t) \quad (18)$$

式(18)中 g 的大小决定了干扰信号的增加量, 定义为干扰加强系数。用 $\mathbf{Y}_1(t)$ 代替 $\mathbf{Y}(t)$, 得到新的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{Y_1} = E[\mathbf{Y}_1(t)\mathbf{Y}_1^H(t)] = (\mathbf{I} + g\mathbf{P})\mathbf{R}_Y(\mathbf{I} + g\mathbf{P}^H) \quad (19)$$

为了进一步提高算法的稳健性, 与式(14)类似, 采用对角加载来改善波束指向性能:

$$\bar{\mathbf{R}}_{Y_1} = \mathbf{R}_{Y_1} + \delta_L^2 \mathbf{I} \quad (20)$$

最后, 可求得最终的自适应权为:

$$\mathbf{W} = \mu''' \bar{\mathbf{R}}_{Y_1}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) \quad (21)$$

根据上述分析, 经过自适应权矢量加权后, 基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法的阵列输出为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(t) &= \mathbf{Z}_s(t) + \mathbf{Z}_{i+n}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{Y}_1(t) = \\ &= \mathbf{W}^H (\mathbf{I} + g\mathbf{P}) \mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}^H (\mathbf{I} + g\mathbf{P}) \mathbf{B}\mathbf{X}(t) = \\ &= \mathbf{W}^H (\mathbf{I} + g\mathbf{P}) \mathbf{B}\mathbf{a}(\theta_0) s_0(t) + \\ &= \mathbf{W}^H (\mathbf{I} + g\mathbf{P}) \mathbf{B} \left(\sum_{i=1}^p \mathbf{a}(\theta_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法的阵列抗干扰输出信干噪比(SINR)可表示为:

$$\text{SINR}_o = \frac{E[\mathbf{Z}_s(t)\mathbf{Z}_s^H(t)]}{E[\mathbf{Z}_{i+n}(t)\mathbf{Z}_{i+n}^H(t)]} \quad (23)$$

4 仿真分析

考虑一个由 20 个各向同性阵元组成的半波长均匀线阵,3 个互不相关的干扰信号分别由 3° , -60° 和 20° 入射到天线阵列。主瓣干扰干噪比为 3 dB,2 个旁瓣干扰干噪比分别为 20 dB 和 30 dB。目标信号在 0° 方向,信噪比为 0 dB,快拍数为 100,干扰加强系数 $g=50$ 。

4.1 仿真 1

图 2 为经对角加载改善前后基于特征投影预处理的自适应方向图和一般方向图的比较。从仿真图中可以得出:未经对角加载改善的自适应波束形成算法可以有效地解决副瓣电平增高、主波束严重变形的问题,但是存在一定的波束偏移,见图 2(a),而经过对角加载改善后则完全解决了这个问题,见图 2(b)。

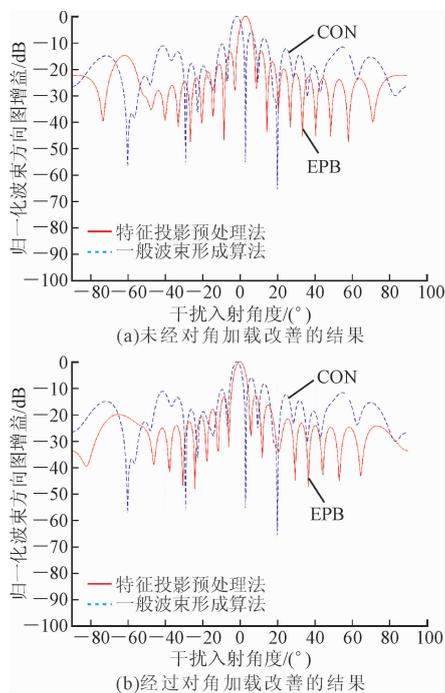


图 2 传统算法和 EPB 算法的方向图结果对比

Fig. 2 Adaptive array patterns of LCMV and EPB methods for mainlobe interference suppression

4.2 仿真 2

图 3 为考虑基于特征投影预处理(EPB)的自适应波束形成算法和本文所提算法(Proposed)在主瓣干扰干噪比变化时的自适应方向图。

主瓣干扰的入射角度为 3° 。2 个旁瓣干扰的入射角度分别为 -60° 和 20° ,其干噪比分别为 20 dB

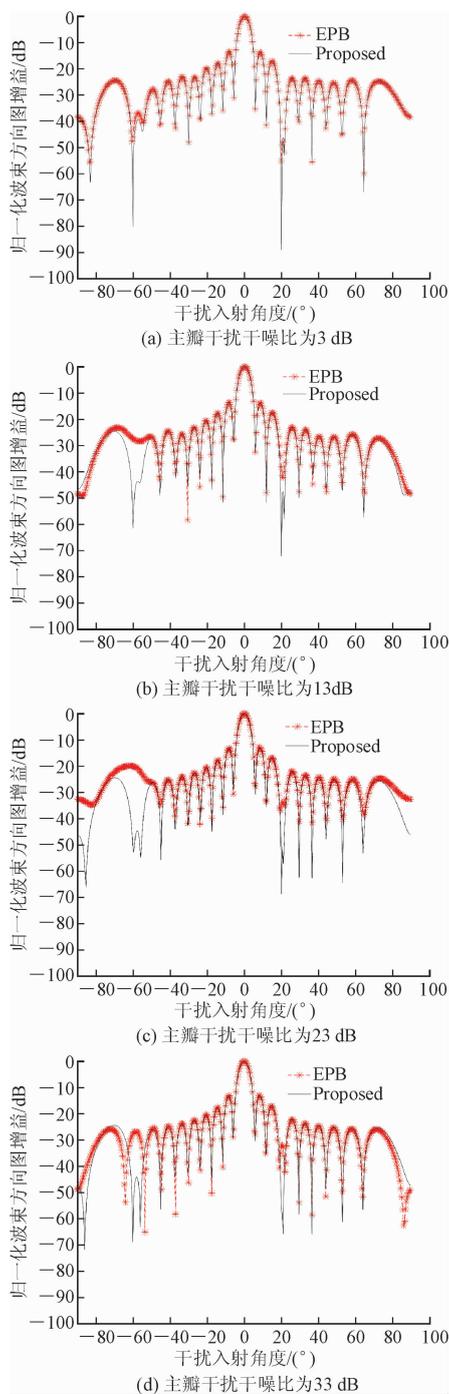


图 3 存在主瓣干扰时的自适应方向图

Fig. 3 Adaptive array patterns of EPB and proposed methods for mainlobe interference suppression

和 30 dB。从图 3(a)中可以看到,当主瓣干扰干噪比为 3 dB 时,EPB 算法在 -60° 和 20° 2 个旁瓣干扰方向上形成的零陷为 -48 dB 和 -55 dB,本文所提出的算法在两旁瓣干扰方向上形成的零陷为 -80 dB 和 -89 dB,2 种算法均可以有效地抑制主旁瓣干扰。当主瓣干扰的干噪比为 13 dB 时,从图 3(b)中可以看到,EPB 算法在 -60° 方向上基本没有零陷,在 20° 方向上形成的零陷变浅,而本文提出的算法仍可以在 2 个旁瓣干扰方向上形成 -62 dB 和

-72 dB 的深零陷。从图 3(c)中可以看到,当主瓣干扰的干噪比为 23 dB 时,EPB 算法在 -60° 方向上没有零陷,在 20° 方向上形成的零陷变得更浅,从而导致 EPB 算法无法有效地抑制旁瓣干扰,而本文所提的算法在旁瓣干扰方向上仍可以保持比较深的零陷。当主瓣干扰的干噪比为 33 dB 时,从图 3(d)中可以看到,EPB 算法在 -60° 和 20° 旁瓣干扰方向均未形成零陷,而本文所提出的算法均能形成较深的零陷,从而可以有效解决当主瓣干扰干噪比较高时 EPB 算法无法有效抑制旁瓣干扰的问题。

4.3 仿真 3

图 4 是主瓣干扰干噪比为 23 dB 时,一般的自适应波束形成算法、EPB 算法和本文所提出的算法在不同快拍数下的输出信干噪比的变化曲线。从图 4 可以看出,当主瓣干扰功率为 23 dB 时,EPB 算法和本文所提出的算法比一般的自适应波束形成算法收敛速度快,且本文所提出的算法较 EPB 算法而言具有更好的输出信干噪比性能。

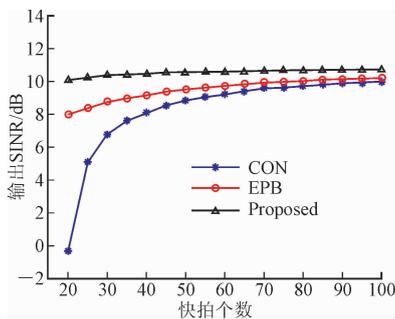


图 4 主瓣 INR=23 dB 时不同快拍数下的输出信干噪比

Fig. 4 The comparison among output SINRs of LCMV, EPB and proposed methods versus the number of snapshots for that the mainlobe ratio of jamming to noise is 23 dB

5 结语

本文提出了基于特征投影预处理零陷加深的抗主瓣干扰算法,该算法除了具有 EPB 算法本身的特点外,还能够在旁瓣干扰方向形成较深的零陷,解决了 EPB 算法在主瓣干扰功率较高时旁瓣干扰抑制能力下降的问题。当然,在雷达实际工作中会出现更加复杂的情形,这有待于在后续工作中进一步开展研究。

参考文献 (References):

[1] VENDIK O G, KOZLOV D S. Phased Antenna Array with a Sidelobe Cancellation for Suppression of Jamming [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11(8): 648-650.

[2] VANTREES, HARRY L. Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory [M]. USA: Wiley-Interscience, 2002.

[3] 王永良, 丁前军, 李荣峰. 自适应阵列处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
WANG Y L, DING Q J, LI R F. Adaptive array processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)

[4] WANG Y, BAO, CHEN. Multiple Mainlobe Interferences Suppression Based on Subspace Matrix Filtering and Covariance Matrix Reconstruction [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2016, 10(4): 035008.

[5] YANG X, YIN P, ZENG T. Mainlobe Interference Suppression Based on Large Aperture Auxiliary Array [C]// Antennas and Propagation. IEEE, 2012: 317-318.

[6] DAI H, WANG X, LI Y, et al. Main-Lobe Jamming Suppression Method of Using Spatial Polarization Characteristics of Antennas [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(3): 2167-2179.

[7] 李荣峰, 王永良, 万山虎. 一种在主瓣干扰条件下稳健的自适应波束形成方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 25(7): 61-64.
LI R F, WANG Y L, WAN S H. Robust Adaptive Beam Forming Under Main Lobe Interference Conditions [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(7): 61-64. (in Chinese)

[8] 苏保伟, 王永良, 李荣峰, 等. 阻塞矩阵方法对消主瓣干扰 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(11): 1830-1832.
SU B W, WANG Y L, LI R F, et al. Mainlobe Interference Cancelling Method Via Block Matrix [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(11): 1830-1832. (in Chinese)

[9] 李荣峰, 王永良, 万山虎. 主瓣干扰下自适应方向图保形方法的研究 [J]. 现代雷达, 2002, 24(3): 50-53.
LI R F, WANG Y L, WAN S H. Research of Reshaping Adapted Pattern under Mainlobe Interference Conditions [J]. Modern Radar, 2002, 24(3): 50-53. (in Chinese)

[10] 马诺莱克思. 统计与自适应信号处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
MANOLAKIS. Statistical and Adaptive Signal Processing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003. (in Chinese)

[11] 张小飞, 汪飞, 徐大专. 阵列信号处理的理论和应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010.
ZHANG X F, WANG F, XU D Z. The Theory and

- Application of Array Signal Processing [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [12] CHANG L, YE H C C. Effect of Pointing Error on the Performance of the Projection Beamformer [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1993, 41(8): 1045-1056.
- [13] 罗云. 主瓣内外干扰同时抑制的分维测向算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014
LUO Y. Dimension-Separated DOA Estimation Algorithm for Anti Mainlobe and Sidelobe Interference [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [14] COX H. Some Improvements to Dominant Mode Rejection Adaptive Beamforming [C]// Proceedings of the Adaptive Sensor Array Processing (ASSP) Workshop, Lexington, MA, 1998: 473-486.
- [15] 张明明. 相控阵雷达抗主瓣干扰方法及应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
ZHANG M M. Research on Mainlobe Interference Suppression Method and Application with Phased Array Radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [16] CARLSON B D. Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Loading in Adaptive Arrays [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems, 1988, 24(4): 397-401.
- [17] 刘聪锋, 杨洁, 甘昶. 加载与约束结合的主瓣干扰抑制方向图保形 [J]. 电波科学学报, 2012(2): 138-143. (in Chinese)
LIU C F, YANG J, GAN C. Reshaping Pattern under Mainlobe Interference Suppression with Combining Diagonal Loading and Linear Constraints [J]. The Chinese Journal of Radio Science, 2012(2): 138-143.
- [18] 朱德智, 吕新正, 黄鹤. 零陷加深的自适应波束形成技术研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 365-369.
ZHU D Z, LV X Z, HUANG H. Research on Augment of Null Depth for Adaptive Beamformer [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(4): 365-369. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

(上接第 47 页)

- ZHAO W, SAN Y. Fuzzy Neural Network Based on q -Gaussian and Its Application in Operational Effectiveness Evaluation of Planes [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(6): 674-678. (in Chinese)
- [15] ENEL L, GUILLEM F. Improvements in Navy Data Networks and Tactical Communication Systems [J]. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 18: 97-101.
- [16] 杨磊. 战术数据链协同分层模型及效能评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
YANG L. Research on Tactical Data Link Interoperable Layered Model and Efficiency Evaluating Method [D]. Changshan: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [17] JEON S, YIM Z, SEO J S. Path Loss Model for Coupling Loop Interference with Multiple Reflections over Single Frequency Network [J]. IETE Technical Review, 2012, 29(6): 499-500.
- [18] KANG S, WANG H. Analysis of Microwave over-the-Horizon Propagation on the Sea [J]. Microwave Conference, 2009, 36(1): 1545-1548.
- [19] CHEN J, MU Y P, LI D F. Study on Effect Evaluation of Weapon Coordinated Use of Fleet [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2009, 23(3): 66-71.
- [20] ENEL L, GUILLEM F. Improvements in Navy Data Networks and Tactical Communication Systems [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2006, 18: 97-101.
- [21] KOKKONEN M, PIETILA S. Anew Bit Synchronization Method of a GPS Receiver [C]// Proc IEEE Positioning, Location, and Navigation Symposium (PLANS), Palm Springs, CA, USA; IEEE, 2002.
- [22] HASHIM S, BUKHARI R, SIRAJ S. PRACB: A Novel Channel Bonding Algorithm for Cognitive Radio Sensor Networks [J]. IEEE Access, 2016, 4(99): 6950-6963.

(编辑: 徐楠楠)