

# 一种无需先验信息的抗多点源干扰方法

晏 冲, 张永顺, 葛启超, 潘 帅

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 针对存在主瓣干扰在内的多点源干扰情况, 现有的阻塞矩阵预处理和特征投影预处理都取得了一定的抗干扰效果, 其主要思想都是先通过预处理消除主瓣干扰, 再进行常规自适应波束形成, 实现对主瓣干扰的抑制, 但是这 2 种方法需要期望和干扰的先验信息来构造预处理矩阵。为解决实际运用当中先验信息无法直接获取的问题, 采用强弱信号波达方向估计方法和估计出期望信号方向和干扰方向, 再结合基于伪协方差矩阵的特征投影预处理的主瓣抗干扰方法, 得到一种无需先验信息的抗多点源干扰算法。仿真实验结果表明, 所提方法在不知道角度先验信息的条件下于多点源干扰处形成了大于 60 dB 的空陷, 且相比于其他方法, 波形保持好, 受快拍数的影响小, 取得了较好的抗多点源干扰效果。

**关键词** 主瓣抗干扰; 波达方向估计; 协方差矩阵重构; 自适应波束形成

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.03.016

**中图分类号** TN911 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)03-0097-06

## A Method to Anti-Multipoint Source Interference Study without Prior Information

YAN Chong, ZHANG Yongshun, GE Qichao, PAN Shuai

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To deal with the problem of multipoint source interference including main lobe interference, the two methods of suppressing the main-lobe interference based on blocking matrix preprocessing and based on eigen-projection matrix preprocessing are quite good in anti-interference effect, and their main ideas are main-lobe interference eliminated by pretreatment of first, then the conventional adaptive beam formation, the implementation of the main-lobe interference suppression, but the two methods need to expect a prior information matrix to construct the pretreatment and interference. Aimed at the problem that the prior information fails to be obtained directly in the practical application, a new type of principal anti-multipoint source interference algorithm without prior information is proposed in combination with the method of the preprocessing of the characteristic projection with the estimation of the arrival direction of the strong and weak signal. The simulation results show that the proposed method is fairly good in the effectiveness of anti-multipoint source interference effect without knowing the prior information of angle.

**Key words:** main-lobe anti-interference; DOA estimation; covariance matrix reconstruction; adaptive beam formation

**收稿日期:** 2018-11-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(61501501)

**作者简介:** 晏 冲(1994—), 男, 贵州遵义人, 硕士生, 主要从事阵列天线抗干扰研究。E-mail: 1137366857@qq.com

**引用格式:** 晏冲, 张永顺, 葛启超, 等. 一种无需先验信息的抗多点源干扰方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(3): 97-102.  
YAN Chong, ZHANG Yongshun, GE Qichao, et al. A Method to Anti-Multipoint Source Interference Study without Prior Information[J].  
Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(3): 97-102.

常规自适应波束形成技术主要用于抑制旁瓣干扰<sup>[1-4]</sup>,并且可以表现出良好的输出性能,比如通过导向矢量估计改善自适应波束形成技术的性能<sup>[5]</sup>,然而当干扰信号从阵列天线进入后落入方向图主瓣内,常规自适应方法必然在主瓣内出现零陷,导致旁瓣电平升高和主瓣严重变形<sup>[6-7]</sup>。为此,S. J. Yu 等人提出阻塞矩阵方法(BMP)<sup>[8-11]</sup>,根据阵列导向矢量构造阻塞矩阵,在数据进行波束形成之前对消掉对应方向的主瓣干扰,使预处理后的数据没有主瓣干扰,后续处理与一般的旁瓣干扰处理方法相同。这一方法在自适应波束形成技术中得到了广泛的应用,但是其以牺牲阵列自由度为代价,且需要知道主瓣干扰方向信息来构造阻塞矩阵,这在实际工程应用中不容易实现。李荣峰等人提出了基于特征投影预处理(EMP)的算法<sup>[12]</sup>,该方法既不需要主瓣干扰先验信息,也没有自由度的损失,但是需要期望信号方向信息和干扰数量来寻找主瓣干扰特征矢量,且由于特征分解过程是通过协方差矩阵求逆进行的,运算量较大。这在工程应用中也不容易实现。

为此本文结合波达方向估计<sup>[13-14]</sup>和基于伪协方差矩阵改进 EMP 算法,提出一种新的不需要先验信息的主瓣抗干扰算法(prEMP)。波达方向估计是阵列信号处理的一个重要分支,其应用涉及雷达、通信、导航、测控和电子侦察等众多领域。基于空间谱的到达角估计方法,如最大似然(ML)、多重信号分类(MUSIC)、旋转不变子空间(ESPRIT)以及加权子空间拟合(WSF)等方法,由于具有对多信源的测角超分辨能力引起了人们的广泛关注<sup>[15-16]</sup>。但是,当信号源之间夹角较小且功率相差较大时,由于强信号的影响,上述方法难以准确估计出弱信号的波达方向。为此,文献[14]提出了一种基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数同时估计方法,无需迭代步骤,无需信号波达方向精确的先验知识,仅需一次特征分解,可有效地估计出强弱信号的波达方向和信源数,具有运算量小和可实现性好的优点。估计出的强弱信号的波达方向和信源数恰好可以作为下一步主瓣抗干扰方法 EMP 的先验信息,进一步进行主瓣抗干扰。本文针对 EMP 算法进行改进,通过对协方差矩阵重构,形成伪协方差矩阵,无需再构成阻塞矩阵,直接对主瓣干扰信号进行处理,大大减少了算法的复杂程度和计算量。

## 1 阵列模型

设一由  $M$  个各向同性阵元组成的均匀线阵,间距为  $d = \lambda/2$ ,  $\lambda$  为波长。设有  $P$  个远场信号源入射

到阵列上。则在  $t$  时刻阵列天线接收到的回波信号为:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_p)]$  为阵列天线导向矢量矩阵,其中  $\mathbf{a}(\theta_p) = [1, e^{j2\pi d \sin\theta_p/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d \sin\theta_p/\lambda}]^T$  表示第  $p$  个信源的导向矢量;  $\mathbf{s}(t)$  为  $P \times 1$  维信号矢量;  $\mathbf{n}(t)$  为  $P \times 1$  维噪声矢量;

接收数据的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_x = E(\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H(\theta) + \sigma^2\mathbf{I} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R}_s$  为信号协方差矩阵;  $\sigma^2$  为白噪声功率;  $\mathbf{I}$  是  $M$  维的单位阵。

## 2 期望信号波达方向估计

干扰信号的功率往往比期望功率大很多。所以可以通过强弱信号识别来判断雷达所接收信号是干扰信号还是期望信号。文献[14]提出一种基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数估计的方法,较为准确的估计了强弱信号波达方向和信源数,可以应用于解决主瓣抗干扰不知道干扰数量和期望信号波达方向等先验信息的问题。该方法的具体步骤为:

**步骤 1** 估计采样协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{x} \sum_{t=1}^N \mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t) \quad (3)$$

式中:  $N$  为快拍数。

对式(3)进行特征分解,其表达式为:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H = \mathbf{U}_s \mathbf{\Lambda}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Lambda}_n \mathbf{U}_n^H \quad (4)$$

式中:  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, M)$  为协方差矩阵的特征值,且  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_P \geq \lambda_{P+1} \geq \dots \geq \lambda_M$ , 前  $P$  个大特征值对应干扰信号,  $M-P$  个小特征值对应背景噪声。  $\mathbf{U}_s$ 、 $\mathbf{U}_n$  分别为干扰子空间和噪声子空间,  $\mathbf{\Lambda}_s$ 、 $\mathbf{\Lambda}_n$  分别为大特征值和小特征值构成的对角矩阵。

**步骤 2** 用特征值  $\lambda_i$  和特征向量  $\mathbf{u}_i$  计算第  $i$  个特征波束的空间谱:

$$P_i(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}\mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

文献[13]中已经证明,干扰和期望信号不均匀分布于特征波束通道,通过对  $\mathbf{a}^H(\theta)\mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \mathbf{a}(\theta)$  进行归一化的目的是进一步减小干扰信号对期望信号的影响。

**步骤 3** 求出特征波束的空间谱的最大值  $P_{i\max}(\theta)$  以及其对应的角度  $\theta_{i\max}$ , 比较  $P_{i\max}(\theta)$  和旁瓣峰值的平均值  $\bar{P}_{i\text{peak}}$ , 当满足:

$$P_{i\max}(\theta) - \bar{P}_{i\text{peak}} \geq \text{IL} \quad (6)$$

式中: IL 为所设定的判断有无信号的门限值, 则判

断该第  $i$  个信号的入射方向为  $\theta_{i\max}$ 。否则,判断该方向无信号进入。改变  $i$  的值,重复以上步骤,就可以判断出信源数。

### 3 基于伪协方差矩阵的抗主瓣干扰方法

#### 3.1 EMP 算法

EMP 算法流程如下图:

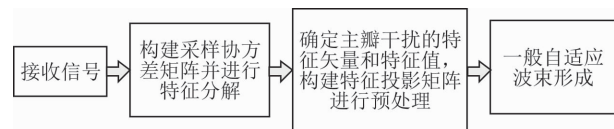


图1 EMP 算法流程图

和信号波达方向估计一样,对协方差矩阵式(3)特征分解得到式(4),主瓣所对应的特征矢量由下面的判断式来确定:

$$|\mathbf{u}_m^H \mathbf{a}(\theta_0)|^2 \geq \rho |\mathbf{a}(\theta_0)|^2 \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{a}(\theta_0)$  为期望信号的导向矢量,  $\theta_0$  可由第2节提出的波达方向估计得到,将  $\theta_0$  代入式(1)中第  $p$  个信源的导向矢量公式,即可得到  $\mathbf{a}(\theta_0)$ ,  $\rho$  为合适的常数因子(在实际运用中不好选取)。得到主瓣干扰对应的特征矢量  $\mathbf{u}_m$  后,构造特征投影矩阵  $\mathbf{B}^{[20]}$ :

$$\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{u}_m (\mathbf{u}_m^H \mathbf{u}_m)^{-1} \mathbf{u}_m^H \quad (8)$$

用  $\mathbf{B}$  对接收信号进行预处理,对消主瓣干扰信号:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}\mathbf{x}(t) \quad (9)$$

最后进行常规波束形成即可。

#### 3.2 基于伪协方差矩阵的 EMP(prEMP)

EMP 算法不需要主瓣干扰的方位信息,但是需要对矩阵求逆,算法比较复杂,而且在寻找主瓣特征矢量时所需的常数因子<sup>[11]</sup>也不好确定。由于相对于其他干扰,主瓣干扰是从方向图的主波束进入的,所以期望信号和干扰信号的方向靠得最近,进而有主瓣干扰对应的导向矢量和期望信号的导向矢量相关系数最大,通常用干扰信号的特征矢量来代替导向矢量。本文就是利用相关系数来确定主瓣干扰的特征矢量  $\tilde{\mathbf{u}}_m$ , 即:

$$\tilde{\mathbf{u}}_m = \operatorname{argmax}_{\mathbf{u}_i} \left| \frac{\mathbf{u}_i^H \mathbf{a}(\theta_0)}{\|\mathbf{u}_i\| \|\mathbf{a}(\theta_0)\|} \right|, i=1, 2, \dots, P \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{u}_i$  为  $\lambda_i$  对应的特征向量。所以本方法不需要选取常数因子就能确定主瓣干扰的特征矢量。

EMP 方法在求得主瓣干扰的特征矢量  $\tilde{\mathbf{u}}_m$  后,需要进一步计算特征投影矩阵  $\tilde{\mathbf{B}}$ ,再用  $\tilde{\mathbf{B}}$  对接收数据进行预处理,对主瓣干扰进行阻塞,计算较为复杂。本文通过对协方差矩阵重构<sup>[8,17-18]</sup>形成伪协方差矩阵

直接生成权矢量对消主瓣干扰,其理论基础如下:

将式(4)代入到常规数字波束形成 SMI 的权矢量<sup>[8-9]</sup>:

$$\mathbf{W}_{\text{SMI}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \hat{\mathbf{R}}_x^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (11)$$

可以得到:

$$\mathbf{W}_{\text{SWI}} = \frac{\mu}{\lambda_{\min}} \left[ \mathbf{a}(\theta_0) - \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i - \lambda_{\min}}{\lambda_i} \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H \mathbf{a}(\theta_0) \right] \quad (12)$$

由此,可以得到 SMI 算法的自适应方向图:

$$\mathbf{F}_a(\theta) = \mathbf{W}_{\text{SMI}}^H \mathbf{a}(\theta)$$

$$\frac{\mu}{\lambda_{\min}} \left[ \mathbf{F}_q(\theta) - \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i - \lambda_{\min}}{\lambda_i} [\mathbf{a}^H(\theta_0) \boldsymbol{\mu}_i] \mathbf{F}_i(\theta) \right] \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{F}_q(\theta)$  表示阵列静态方向图,  $\mathbf{F}_i(\theta)$  表示第  $i$  个干扰的信号对应的特征波束。  $\lambda_i$  为采样协方差矩阵的第  $i$  个特征值且  $\lambda_{\min}$  为最小的特征值。

分析式(13)可以发现,当主瓣干扰对应的特征值的大小与噪声特征值大小接近,则所获得的最优自适应权值将会对消掉主瓣干扰。所以本文用噪声特征值的均方平均  $\bar{\sigma}_n^2$  来代替主瓣干扰的特征值,使主瓣干扰接近噪声。另外,噪声的扰动也会导致天线旁瓣升高,所以可以将噪声对应的小特征值全部替换为  $\bar{\sigma}_n^2$  来降低旁瓣。即有:

$$\tilde{\lambda}_m = \tilde{\lambda}_{p+1} = \dots = \tilde{\lambda}_M = \bar{\sigma}_n^2 \quad (14)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\Lambda}} = \operatorname{diag}(\lambda_1, \dots, \tilde{\lambda}_m, \dots, \lambda_p, \bar{\sigma}_n^2, \dots, \tilde{\lambda}_n) \quad (15)$$

然后利用  $\tilde{\boldsymbol{\Lambda}}$  构造伪协方差矩阵:

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{U} \tilde{\boldsymbol{\Lambda}} \mathbf{U}^H \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_n]$ 。

最后根据伪协方差矩阵,计算出本算法的权矢量:

$$\tilde{\mathbf{W}} = \tilde{\boldsymbol{\mu}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) = \tilde{\boldsymbol{\mu}} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\boldsymbol{\Lambda}}^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{a}(\theta_0) \quad (17)$$

式中:  $\tilde{\boldsymbol{\mu}} / \mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{U} \tilde{\boldsymbol{\Lambda}}^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{a}(\theta_0)$  是一个标量。由于伪协方差阵是对角矩阵,求逆时只需要将对角线上的元素求倒即可,所以减少了一次求逆运算,大大降低了运算量。用权矢量对接收数据进行加权,可得到阵列的最终输出结果。

prEMP 算法流程见图2。

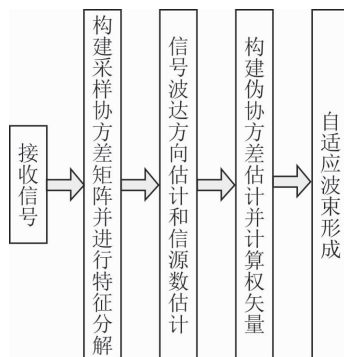


图2 prEMP 算法流程图

## 4 仿真验证

仿真条件:均匀等距线阵,20个阵元,阵元间距为半波长。设期望信号来波方向为 $2^\circ$ ,其信噪比为10 dB。有3个干扰,其来波方向依次为 $5^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $-35^\circ$ 。干噪比依次为30 dB、35 dB、40 dB。快拍数为30。蒙特卡洛仿真次数为10次。

### 4.1 仿真1

基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数估计的方法仿真。结果见图3。

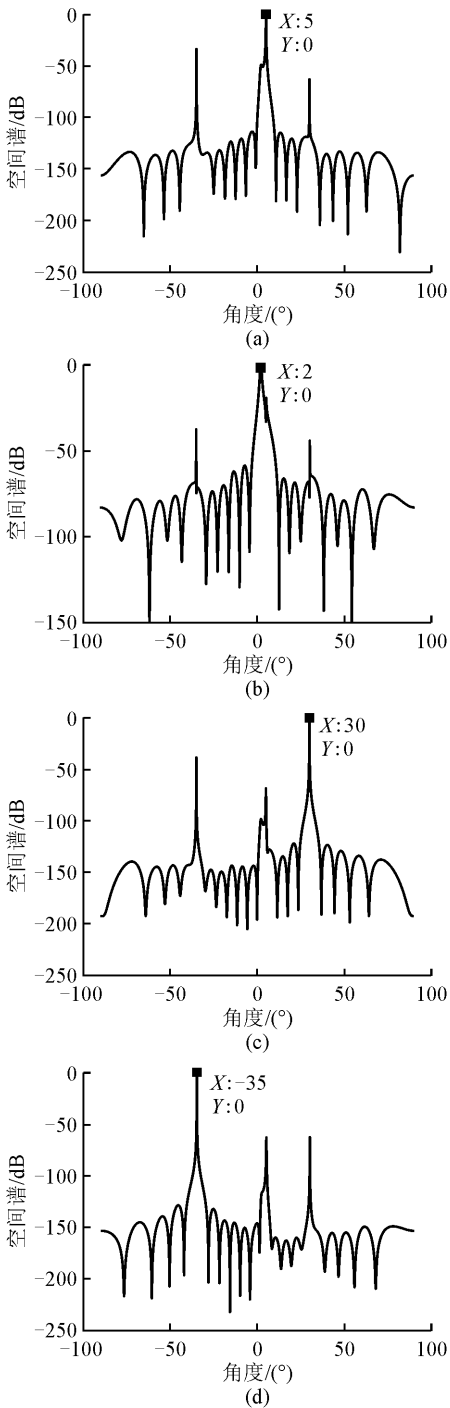


图3 含有信号特征波束的空间谱

由图3(a)、(b)可以看出,图3(a)的特征波束为强信号的波达方向,即干扰信号波达方向。其邻近的图3(b)在干扰处产生一个零陷,其最大值所对应的角为弱信号的波达方向,即为 $\theta_0$ 。仿真结果表明,本方法将期望信号和3个干扰信号全部找出来并估计了他们的波达方向。其角度分别为 $2^\circ$ 、 $4.9^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $-35^\circ$ 。可以看出,2个距离较远的旁瓣干扰测得比较精确,主瓣干扰和期望信号由于距离较近,产生相互影响导致有误差,但是误差不影响后期的协方差矩阵重构。该方法取得了预期的效果。

### 4.2 仿真2

基于伪协方差矩阵的抗主瓣干扰与EMP总效果对比仿真。结果见图4~6。

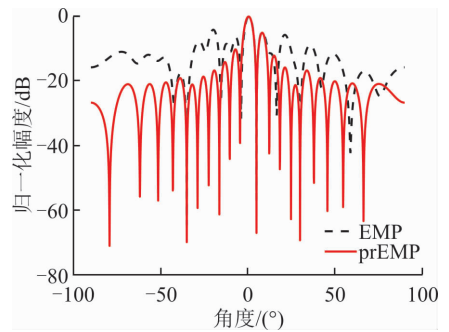


图4 EMP和prEMP比较

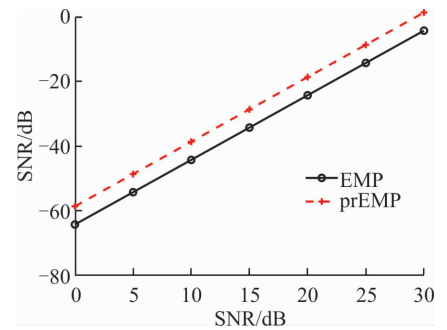


图5 输出SINR与输入SNR变化关系图

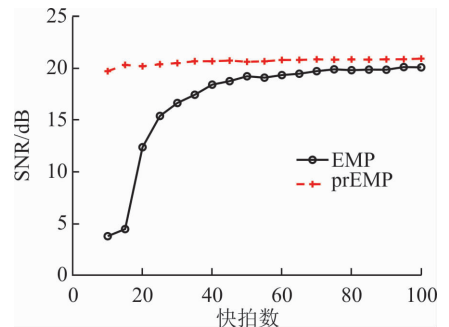


图6 输出SINR与快拍数变化关系图

由图4可以看出,相比于EMP,本文方法在抗主瓣干扰的同时,具有旁瓣较低,波形保持较好等优点。由图5、图6可以看出,相比于EMP,本文方法输出信噪比较高。且随着快拍数的降低,EMP方法

的输出信噪比明显下降,本文方法能够保持较好的输出信噪比。

## 5 结语

本文根据期望信号和干扰信号信号强度不同的特点,采用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,估计出期望信号波达方向和干扰数目,再结合重构协方差矩阵形成伪协方差矩阵的改进 EMP 主瓣抗干扰算法。形成了一种不需要先验信息的新型主瓣抗干扰算法 prEMP (EMP Based on Pseudo Covariance Matrix),在不知道先验信息和大幅减少计算量的条件下,取得了较好的抗干扰效果。但是在波达方向估计中的门限值 IL 如何准确确定,有待下一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] YANG X P, YIN P L, ZENG T. Mainlobe Interference Suppression Based on Large Aperture Auxiliary Array[C]//IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Singapore: IEEE Press, 2012: 1-2.
- [2] VAN V B D, BUCKLEY K M. Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering[J]. IEEE Acoustics, Speech, and Signal Processing Magazine, 1998, 5(2): 4-24.
- [3] 王辉,范中国. 自适应波束形成抗干扰算法研究[J]. 河南科技, 2017(4): 52-53.  
WANG H, FAN Z G, Research on Adaptive Beamforming Anti-Jamming Algorithm[J]. Henan Science and Technology, 2017(4): 52-53. (in Chinese)
- [4] 魏梦瑶. 基于阵列信号处理的自适应波束形成技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2015.  
WEI M Y. Research on Adaptive Digital Beam Forming Technique Based on Array Signal Processing[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [5] YANG T, SU T, ZHU W T, et al. Robust Adaptive Beamforming Using Beamspace Steering Vector Estimation[J]. Electron Lett, 2013, 49(19): 1201-1203.
- [6] 罗章凯,王华力,张翼鹏,等. 主瓣抗干扰算法研究[J]. 军事通信技术, 2014, 35(1): 16-20.  
LUO Z K, WANG H L, ZHANG Y P. Mainlobe Anti-Jamming Algorithms[J]. Journal of Military Communication Technology, 2014, 35(1): 16-20. (in Chinese)
- [7] LIU Z, ZARKI, MAGDA E I. SIR-Based Call Admission Control for DS-CDMA Cellular Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1994, 12(4): 638-644.
- [8] 张宗傲. 阵列雷达自适应主瓣干扰抑制算法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.  
ZHANG Z A. Research on Adaptive Mainlobe Interference Suppression Algorithm of Array Radar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 高阳,许稼,龙腾. 阻塞矩阵抗干扰方法性能分析[J]. 信号处理, 2015, 31(10): 1361-1365.  
GAO Y, XU J, LONG T. Performance Analysis of Anti-jamming Method via Block Matrix[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(10): 1361-1365. (in Chinese)
- [10] JABLON N K. Adaptive Beamforming with the Generalized Sidelobe Canceller in the Presence of Array Imperfections[J]. IEEE Trans on Antenna Propagation, 1986, 34: 996-1012.
- [11] YU S J, LEE J H. Efficient Eigenspace-Based Array Signal Processing Using Multiple Shift Invariant Subarrays [J]. Antenna Propagation, 1999, 47(1): 186-194.
- [12] 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, 24(7): 61-64  
LI R F, WANG Y L, WAN S H. Robust Adaptive Beam Forming under Mainlobe Interference Conditions [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(7): 61-64. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 徐亮,曾操,廖桂生,等. 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 L, ZENG C, LIAO G S, et al. DOA and Source Number Estimation Method for Strong and Weak Signals Based on Eigen Beamforming[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 321-325. (in Chinese)
- [15] CHUNG P J, VIBERG M, MECKLENBRAUKER C F. Broadband ML Estimation under Model Order Uncertainty[C]//Acoustics, Speech and Signal Processing 2009. Taipei: [s. n.], 2009: 2121-2124.
- [16] ZHANG Y, NG B P. MUSIC-like DOA Estimation without Estimating the Number of Sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1668-1676.
- [17] 束宇翔,杨磊,金术玲,等. 基于伪协方差矩阵的强弱邻近信源 DOA 估计方法[J]. 舰船电子对抗, 2015, 38

(5):34-38.

SHU Y X, YANG L, JIN S L, et al. DOA Estimation Method of Strong and Weak Adjacent Signals Based on Pseudo Covariance Matrix [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2015, 38(5):34-38. (in Chinese)

- [18] 杨金金, 刘洛琨, 张剑, 等. 基于干扰矩阵重构的稳健自适应波束形成算法[J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(3):286-292.

YANG J J, LIU L K, ZHANG J, et al. Robust Adaptive Beamforming Algorithm Based on Interference Covariance Matrix Reconstruction [J]. Journal of Information Engineering University, 2014, 15(3):286-292. (in Chinese)

- [19] 潘帅, 张永顺. 基于先验信息的协方差矩阵重构抗干扰算法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9):61-65.

PAN S, ZHANG Y S. Anti-interference Algorithm Based on Covariance Matrix Reconstruction via Prior Information [J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9):61-65 (in Chinese)

- [20] 潘帅, 张永顺, 葛启超, 等. 基于特征投影矩阵的自适应方向图改善方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(2):51-56.

PAN S, ZHANG Y S, GE Q C, et al. Research on Improvement of Adaptive Pattern Based on Eigen-projection Matrix [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition). 2019, 20(2):51-56. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

\*\*\*\*\*

### (上接第 45 页)

- [14] 钟赞, 姚佩阳, 万路军, 等. 多任务执行中无人机行动联盟形成模型及算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10):2248-2254.

ZHONG Y, YAO P Y, WAN L J, et al. UAV Action Coalition Formation Model and Algorithm in Multi-Task Execution [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(10):2248-2254. (in Chinese)

- [15] HU X X, MA H W, YE Q S. Hierarchical Method of Task Assignment for Multiple Cooperating UAV Teams [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(5):1000-1009.

- [16] 修保新. C2 组织结构设计及鲁棒性、适应性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.

XIU B X. Design Methodology of C2 Organizational Structure and Its Analysis of Robustness and Adaptivity [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)

- [17] 钟赞, 姚佩阳, 孙昱. 有人机/UCAV 编队协同作战决策分配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(11):2984-2992.

ZHONG Y, YAO P Y, SUN Y. Decision-Making Allocation Method in Manned/Unmanned Combat Aerial Vehicle Cooperative Engagement [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(11):2984-2992. (in Chinese)

- [18] DAVID M J, CRAIG P L. Application of an Automated Aircraft Architecture Generation and Analysis Tool to Unmanned Aerial Vehicle Subsystem Design [J].

Journal of Aerospace Engineering, 2015, 29(9):1690-1708.

- [19] 万路军, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 有人-无人作战智能体任务联盟形成策略方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(3):10-14.

WAN L J, YAO P Y, SUN P, et al. Strategy of Manned/Unmanned Combat Agents Task Coalition Formation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(3):10-14. (in Chinese)

- [20] 林林, 孙其博, 王尚广, 等. 多无人机协同航路规划研究[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(5):36-40.

LIN L, SUN Q B, WANG S G, et al. Research on Multi-UAV Cooperative Trajectory Planning [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013, 36(5):36-40. (in Chinese)

- [21] 孙昱, 姚佩阳, 孙鹏, 等. 兵力组织适应性设计问题研究[J]. 火力与指挥控制, 2017, 18(3):104-110.

SUN Y, YAO P Y, SUN P, et al. Review of Adaptive Design Problem of Army Organization [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 18(3):104-110. (in Chinese)

- [22] ZHONG Y, YAO P Y, ZHANG J Y, et al. Formation and Adjustment of Manned/Unmanned Combat Aerial Vehicle Cooperative Engagement System [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4):756-767.

(编辑: 徐楠楠)