

主瓣掩护式干扰下单脉冲雷达目标检测方法

张庭赫, 黄学宇, 张启亮

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对单脉冲雷达在目标与干扰视线夹角变小时抗干扰性能显著下降的问题, 提出了一种基于分布式辅助天线的改进型单脉冲雷达抗主瓣掩护式干扰方法。对雷达系统添加分布式辅助天线, 以抗干扰改善因子最大化为准则, 综合运用单脉冲雷达的和、差波束及分布式辅助天线波束在波束域进行自适应干扰抑制, 最后利用恒虚警检测验证所提算法的抗干扰性能, 并与其他方法进行了对比。数值仿真验证了所提抗干扰方法可有效提升抗干扰改善因子及目标检测概率, 当目标、干扰视线夹角较小时亦具备较好的抗干扰性能。

关键词 自适应波束形成; 主瓣干扰; 辅助天线; 目标检测

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.06.009

中图分类号 TN911 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)06-0065-05

A Target Detection Method for Monopulse Radar under Condition of Main Lobe Cover Interference

ZHANG Tinghe, HUANG Xueyu, ZHANG Qiliang

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

Abstract Aimed at the problems that as the angle between the target and the jamming line of sight decreases, the anti-jamming performance of monopulse radar decreases noticeably, this paper proposes an improved anti-jamming method of monopulse radar based on distributed auxiliary antenna. Distributed auxiliary antennas are added in the radar system, the maximization of anti-interference improvement factors must be taken as a guideline, and integrated single-pulse radar beams and distributed auxiliary antenna beams are utilized for performing adaptive interference suppression in the beam domain. Finally, CFAR detection is used to verify the anti-interference performance of the proposed algorithm, in comparison with other methods. The numerical simulation results show that the proposed anti-jamming method can effectively improve the anti-jamming improvement factor and target detection probability, and has a good anti-jamming performance while the target and interference line of sight are at a small angle.

Key words adaptive beam-forming; main lobe interference; auxiliary antenna; target detection

当干扰从旁瓣进入时, 自适应凹口位于旁瓣区域, 常规自适应波束形成技术 (adaptive digital beam forming, ADBF) 能在干扰方向形成零陷, 有效抑制旁瓣干扰^[1]。此外, 旁瓣对消^[2-3]、旁瓣匿

影^[4-5]等抗干扰技术也能对旁瓣干扰起到较好抑制作用。然而, 当干扰从主瓣方向进入时, 干扰信号会获得与目标信号相近的增益, 造成信干噪比下降, 主瓣方向偏移等问题, 增加了雷达干扰对抗难度^[6]。

收稿日期: 2023-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(62201612)

作者简介: 张庭赫(1999-), 男, 河南许昌人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: 1007066124@qq.com

引用格式: 张庭赫, 黄学宇, 张启亮. 主瓣掩护式干扰下单脉冲雷达目标检测方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 65-69. ZHANG Tinghe, HUANG Xueyu, ZHANG Qiliang. A Target Detection Method for Monopulse Radar under Condition of Main Lobe Cover Interference [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 65-69.

针对主瓣干扰抑制问题,研究人员提出了一系列有效方法。其中阻塞矩阵(blocking matrix processing, BMP)^[7-8]方法和特征投影(eigen-projection matrix processing, EMP)^[9-10]方法因操作简单,便于工程实现而被广泛应用。文献[11]提出了一种EMP预处理零陷加深(EMP zero deepening, EMPZD)算法,通过加深零陷降低干扰对天线自适应方向图的影响。文献[12]提出了一种单脉冲雷达空域滤波(monopulse radar spatial filtering, MRSF)算法,利用改进型最小方差无偏估计(minimum variance distortionless response, MVDR)算法对接收信号进行波束间空域滤波,令输出信号的改善因子最大化。文献[13]通过改进阻塞矩阵(improved BMP, IMBMP)算法以得到比传统BMP算法更强的抗干扰性能。文献[14]利用主瓣干扰抵消(mainlobe jamming cancellation, MLC)算法对主瓣干扰进行处理。文献[15]提出了一种将BMP与协方差矩阵重构(covariance matrix reconstruction, CMR)结合的BMP-CMR算法,可有效改善天线自适应方向图。文献[16]提出一种基于大孔径辅助阵列天线的抗干扰方法,运用自适应信号处理算法对主天线与辅助天线接收到的信号进行自适应干扰抑制,其抗干扰性能主要由辅助天线孔径决定。

通过对上述方法进一步分析可知,主瓣掩护式干扰背景下的目标检测性能主要受限于天线孔径及目标与干扰视线夹角。针对此问题,本文提出一种基于分布式辅助天线的改进型单脉冲雷达抗主瓣掩护式干扰方法。对比文献[16],本文方法中的辅助天线为孔径更小的单天线,且辅助天线数量不会受到阵元间距等参数限制。

1 信号模型

本文提出的分布式多天线系统由1个主天线和2个辅助天线组合而成。主天线为均匀阵列单脉冲天线,包含 $M_1 \times M_2$ 个阵元;2个辅助天线均为抛物面天线。辅助天线1与主天线的距离为 D_1 ,辅助天线2与主天线的距离为 D_2 。该系统如图1所示。

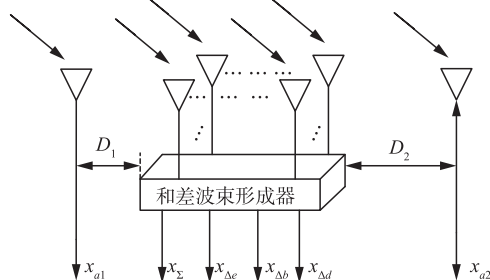


图1 分布式多天线系统组成框图

主瓣干扰背景下,该系统的接收信号可表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{G}\mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_\Sigma, \mathbf{x}_{\Delta e}, \mathbf{x}_{\Delta b}, \mathbf{x}_{\Delta d}, \mathbf{x}_{a1}, \mathbf{x}_{a2}]$; \mathbf{G} 为增益矩阵; \mathbf{S} 为目标信号和干扰组成的矩阵; \mathbf{N} 表示各个接收通道内的噪声。此处假设各通道内的噪声为独立同分布零均值高斯噪声。

增益矩阵 \mathbf{G} 可表示为:

$$\mathbf{G} = [\mathbf{g}_j, \mathbf{g}_t] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{g}_j = [g_{\Sigma j}, g_{\Delta e j}, g_{\Delta b j}, g_{\Delta d j}, g_{a1 j}, g_{a2 j}]^T$ 为干扰增益向量; $\mathbf{g}_t = [g_{\Sigma t}, g_{\Delta e t}, g_{\Delta b t}, g_{\Delta d t}, g_{at1}, g_{at2}]^T$ 为目标信号增益向量。 $g_{\Sigma j}, g_{\Delta e j}, g_{\Delta b j}, g_{\Delta d j}$ 分别代表干扰和通道增益、俯仰差通道增益、方位差通道增益、双差通道增益^[12]。 $g_{a1 j}, g_{a2 j}$ 分别代表辅助天线1、辅助天线2产生的干扰增益。 $g_{\Sigma t}, g_{\Delta e t}, g_{\Delta b t}, g_{\Delta d t}$ 分别代表目标信号和通道增益、俯仰差通道增益、方位差通道增益、双差通道增益。 g_{at1}, g_{at2} 分别代表辅助天线1、2产生的目标信号增益。

接收信号 \mathbf{S} 可以表示为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_j \\ \mathbf{S}_{t3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jQ} \\ S_{t1}, S_{t2}, \dots, S_{tQ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Q 为快拍数。

2 算法原理

本文通过对分布式多天线系统输出信号进行波束域自适应滤波处理抑制干扰信号,并进一步利用恒虚警检测准则检测目标信号。算法流程见图1。

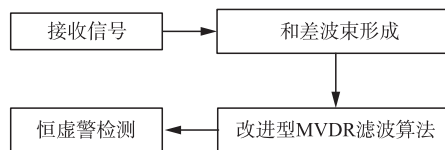


图2 算法流程图

2.1 改善因子

抗干扰改善因子(electronic counter-counter-measure improvement factors, EIF)^[17]是衡量雷达抗干扰措施对抗干扰性能改善程度的重要指标。通常采用采取了抗干扰措施的输出信干比(signal to jamming ratio, SJR)与输入SJR的比值来计算EIF。但在实际中,干扰与噪声很难分离,因此,本文用信干噪比(signal to jamming plus noise ratio, SJNR)代替SJR计算EIF,此时计算公式为:

$$EIF = \frac{SJNR_0}{SJNR_1} \quad (4)$$

式中: $SJNR_I$ 和 $SJNR_O$ 为采用抗干扰措施前后的 $SJNR$ 。

2.2 空域滤波

本文对接收信号 \mathbf{X} 进行波束域滤波以抑制干扰信号。为了 EIF 最大化, 滤波器参数需满足如下优化模型:

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{g}_t = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{g}_t 为目标信号的增益矢量; \mathbf{w} 为待求空域滤波器。约束条件 $\mathbf{w}^H \mathbf{g}_t = 1$ 用于保证滤波器对目标信号保持恒定增益。

用拉格朗日乘子法求解该优化模型, 定义:

$$\zeta = \mathbf{w}^H \mathbf{X} \mathbf{X}^H \mathbf{w} + \lambda (\mathbf{w}^H \mathbf{g}_t - 1) \quad (6)$$

令 $\frac{\partial \zeta}{\partial \mathbf{w}^*} = 0$, 可得:

$$\mathbf{w} = \lambda (\mathbf{X} \mathbf{X}^H)^{-1} \mathbf{g}_t \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 得到:

$$\lambda = \frac{1}{\mathbf{g}_t^H (\mathbf{X} \mathbf{X}^H)^{-1} \mathbf{g}_t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)有:

$$\mathbf{w} = \frac{(\mathbf{X} \mathbf{X}^H)^{-1} \mathbf{g}_t}{\mathbf{g}_t^H (\mathbf{X} \mathbf{X}^H)^{-1} \mathbf{g}_t} \quad (9)$$

则滤波输出为:

$$s = \mathbf{w}^H \mathbf{X} \quad (10)$$

2.3 恒虚警检测

本文利用恒虚警检测算法进行目标检测。恒虚警检测器原理如图3所示。

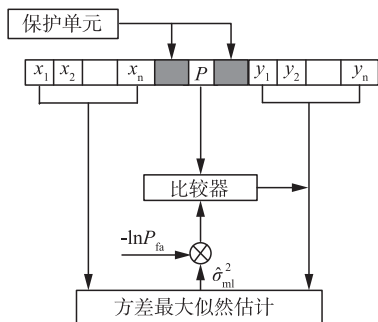


图3 恒虚警检测器原理框图

图3中 $x_n (n=1, 2, \dots, N)$ 为前沿滑窗的参考单元电压, $y_n (n=1, 2, \dots, N)$ 为后沿滑窗的参考单元电压。 P 为被检测单元功率。基于信号瞬时功率进行目标检测时, 自适应判决准则为:

$$P \leq_{H_2}^{H_1} P_{th} \quad (11)$$

式中: P_{th} 为功率检测门限。

对 P_{th} 进行计算时, 假设所有采样单元内的噪声为独立同分布零均值复高斯噪声, 即 $X \sim CN(0, \sigma^2/2)$, $Y \sim CN(0, \sigma^2/2)$ 。其中 σ^2 为噪声方差。则被检测单元噪声功率 P_N 服从指数分布^[18], 且其概率密度函数可以表示为:

$$f(P_N) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{P_N}{\sigma^2}} \quad (12)$$

因此, 虚警率 P_{fa} 与检测门限 P_{th} 的关系可表示为:

$$P_{fa} \int_{P_{th}}^{+\infty} \frac{e^{-P_N/\sigma^2}}{\sigma^2} dP_N = \exp(-\frac{P_{th}}{\sigma^2}) \quad (13)$$

由式(12)解得门限 P_{th} 为:

$$P_{th} = -\sigma^2 \ln P_{fa} \quad (14)$$

工程运用中, σ^2 可通过最大似然估计法计算, 即:

$$\hat{\sigma}_{ml}^2 = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N [(x_n - \hat{\mu}_{ml})^2 + (y_n - \hat{\mu}_{ml})^2] \quad (15)$$

$$\hat{\mu}_{ml} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N (x_n + y_n) \quad (16)$$

式中: $\hat{\mu}_{ml}$ 为参考单元电压均值的最大似然估计。

结合式(14)与式(15), 可确定检测门限为:

$$P_{th} = -\frac{\ln P_{fa}}{2N} \sum_{n=1}^N [(x_n - \hat{\mu}_{ml})^2 + (y_n - \hat{\mu}_{ml})^2] \quad (18)$$

3 仿真实验

3.1 参数设置

假设本文提出的分布式多天线系统由1个阵元数 80×80 的主天线和2个辅助天线组成。其中主天线的阵元间距为半波长, 辅助天线与主天线的位置关系见图1。 $D_1 = 20$ m, $D_2 = 30$ m。主天线和2个辅助天线的俯仰维、方位维波束指向均为 0° , 3 dB波束宽度均为 1° 。2个辅助天线的方向图建模为 sinc 函数, 且增益均为 38 dB。快拍数 $Q = 2000$ 。信号空间存在1个目标信号和1个与目标信号互不相干的主瓣干扰信号。其中目标信号的波长为 0.05 m, 干扰信号来向的俯仰角和方位角均为 0° , 噪声为独立同分布的高斯白噪声, 接收信号的 SJR 为 -30 dB。目标雷达截面积变化规律符合 Swerling I 模型。验证 EIF 和检测概率随目标角度的变化情况时, 目标信号俯仰角和方位角均在 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$ 范围内, 按步进量 0.05° 进行取值, 信噪比为 20 dB; 验证 EIF 和检测概率随 SNR 的变化情况时, 目标信号俯仰角和方位角均为 0.5° , 信噪比在 -10 dB ~ 10 dB 范围内, 按步进量 1 dB 进行取值。

3.2 计算 EIF

为验证所提算法的抗干扰性能, 以输出 EIF 为标准, 将所提算法的输出 EIF 作对比。其中, MRSF 算法所用天线为与主天线规格相同的单脉冲天线。根据式(4), 分别计算6种算法的输出 EIF, 进行

1 000 次蒙特卡洛实验取均值。不同算法的输出 EIF 随目标信号俯仰角和方位角的变化曲线见图 4。

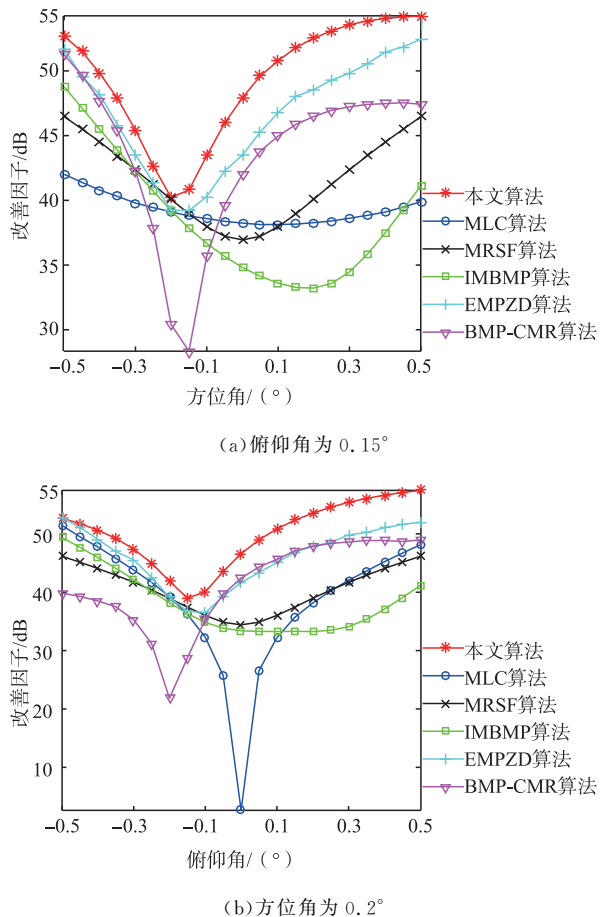


图 4 输出 EIF 随目标角度变化曲线

从图 4 可看出,当干扰从主瓣方向进入时,6 种算法的输出 EIF 均有波动。此外,在同等条件下,本文算法的输出 EIF 在各角度下均高于另外 5 种算法,证明本文算法抗干扰性能更强。

为研究本文算法抗干扰性能与输入 SNR 的关系,计算不同 SNR 下本文算法与另外 5 种算法的输出 EIF,并进行对比。进行 1 000 次蒙特卡洛实验,不同算法的输出 EIF 结果见图 5。

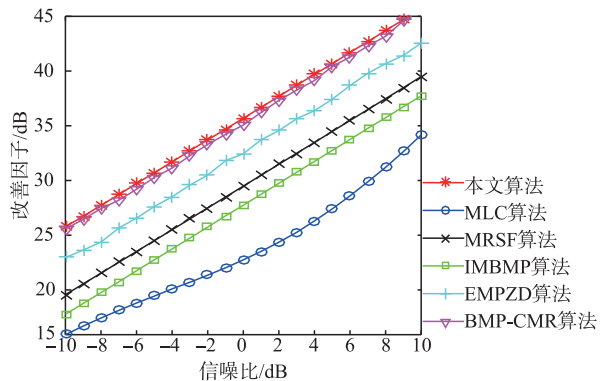


图 5 固定角度下 EIF 随输入 SNR 的变化曲线

从图 5 可以看出,在目标角度不变的情况下,随

着信噪比增大,输出 EIF 也随之增大,本文算法的输出 EIF 高于另外 5 种算法,证明了本文算法拥有更好的抗干扰性能。

3.3 检测概率计算

为验证所提算法的检测性能,将本文算法的检测概率分别与 3.2 节中 5 种算法进行比较,仿真参数相同。采用 2.3 节中的 CA-CFAR 算法计算检测概率,设参考单元为 20 个,保护单元为 6 个,虚警概率 $P_{fa}=1 \times 10^{-6}$ 。在每个角度下进行 1 000 次蒙特卡洛仿真。6 种算法的检测概率见图 6。

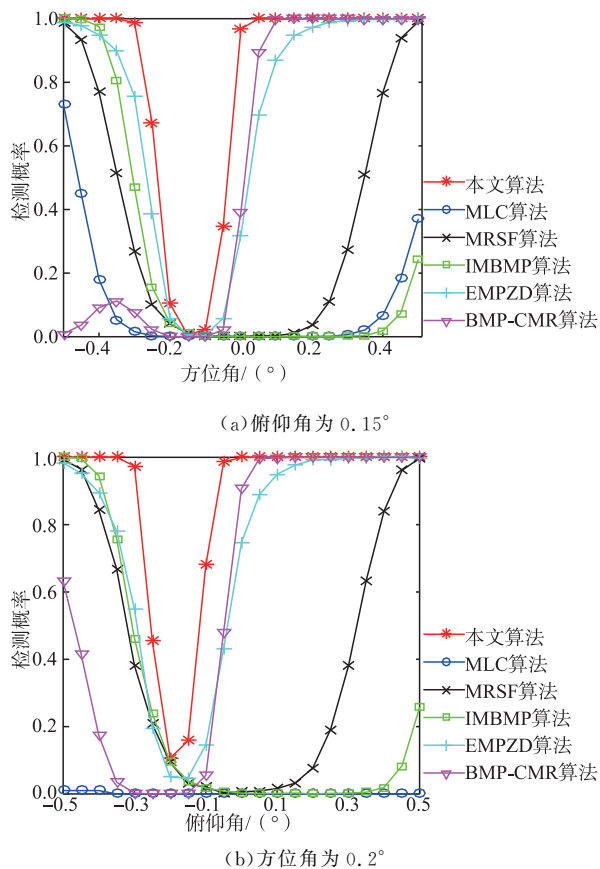


图 6 检测概率随目标角度变化曲线

从图 6 中的结果可看出,在主瓣干扰环境下,当目标信号与主瓣干扰的视线夹角接近时,6 种算法的检测概率均有下降,且固定方位角时,MLC 算法检测概率接近 0。理论分析是此方位角下改善因子过低导致漏警,严重影响目标检测概率。从图 6 还可看出,相同条件下,本文算法的检测概率随着角度变化波动较小,检测概率高于另外 5 种算法,证明了本文算法检测性能更强。

为进一步观察本文算法检测概率与输入 SNR 的关系,计算 6 种算法的检测概率,对应的检测概率随 SNR 变化情况见图 7。

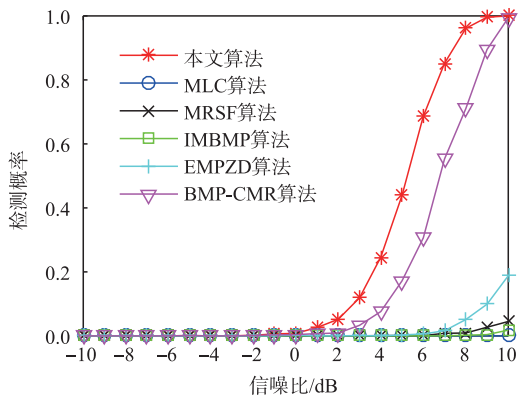


图7 固定角度下检测概率随 SNR 的变化曲线

从图7可以看出,随着 SNR 增大,检测概率逐渐增大。且在相同条件下,本文算法检测概率相较于其他5种算法更高,与图5中改善因子相对应,证明所提算法检测性能良好。

4 结语

本文提出了一种基于分布式辅助天线的改进型单脉冲雷达抗主瓣掩护式干扰方法。与大多数文献中侧重于算法改进不同,本文从天线入手,将 MRSF 算法中的单脉冲天线改为分布式多天线,利用天线间的波程差,降低空域滤波时干扰的分离难度。该方法性能稳定、复杂度较低,由于不需要大孔径天线,因此相比于文献[16],本文方法更易于工程实现,由于本文方法中辅助天线数量不受限制,且该方法性能和天线数量成正比,因此理论上,本文方法的性能上限比文献[16]更高。仿真结果表明:相较于另外5种算法,所提方法可有效提升干扰视线夹角较小时的抗干扰性能和目标检测概率。

参考文献

- [1] MAHAFZA B R, ELSHERBENI A. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [2] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [3] EL A I, AFIFI M S, EXCELL P S. A Simple Algorithm for Sidelobe Cancellation in a Partially Adaptive Linear Array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1482-1486.
- [4] SPRIET A, MOONEN M, WOUTERS J. Robustness Analysis of Multichannel Wiener Filtering And Generalized Sidelobe Cancellation for Multimicrophone Noise Reduction in Hearing Aid Applications [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2005, 13(4): 487-503.
- [5] FARINA A, GINI F. Calculation of Blanking Probability for the Sidelobe Blanking for Two Interference Statistical Models[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1998, 5(4): 98-100.
- [6] SHNIDMAN D A, SHNIDMAN N R. Sidelobe Blanking with Expanded Models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 790-805.
- [7] 胡海涛,张剑云,李小波,等. 基于阻塞矩阵预处理的抗主瓣干扰算法[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(5): 94-99.
- [8] 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.
- [9] YU S J, LEE J H. Efficient Teigenspace-Based Array Signal Processing Using Multiple Shift-Invariant Subarrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(1): 186-194.
- [10] ASL B M, MAHLOOJIFAR A. Eigenspace-Based Minimum Variance Beamforming Applied to Medical Ultrasound Imaging[J]. IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(11): 2381-2390.
- [11] 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.
- [12] WANG L, ZHANG Q, WAN P. Monopulse Radar Target Detection in the Case of Main-Lobe Cover Jamming[J]. Electronics, 2022, 11(21): 35-39.
- [13] 潘鑫锐,宫健,陈赓,等. 基于改进阻塞矩阵的抗主瓣干扰算法[J]. 光电与控制, 2022, 29(2): 25-29.
- [14] YU K B, MURROW D J. Adaptive Digital Beamforming for Angle Estimation in Jamming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 508-523.
- [15] 张萌,胡敏,宋万杰,等. 基于 BMP 及 CMR 的抗主瓣干扰算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(3): 233-238, 246.
- [16] YANG X, YIN P, ZENG T, et al. Applying Auxiliary Array to Suppress Mainlobe Interference for Ground-Based Radar [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 433-436.
- [17] JOHNSTON S L. The ECCM Improvement Factor (EIF)-Illustrative Examples, Applications, and Considerations in Its Utilization in Radar Eccm Performance Assessment [C]//International Conference on Radar. [S.l.]:[s.n.], 1986: 149-154.
- [18] SIMON M K. Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables: A Handbook for Engineers and Scientists[M]. Boston-Dordrecht-London: Kluwer Academic Publishers, 2002.

(编辑:徐敏)