

基于二次补偿的 FDA-MIMO 雷达抗主瓣欺骗式干扰方法

张逸群, 兰 岚*, 廖桂生, 许京伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘 要: 主瓣欺骗式干扰与真实目标具有相同角度, 传统相控阵雷达无法在空域对其进行区分, 严重降低了对真实目标的探测性能。针对此问题, 本文在频率分集阵列多输入多输出(frequency diversity array multiple input multiple output, FDA-MIMO)雷达中提出一种基于二次补偿的抗主瓣欺骗式干扰方法。首先, 通过对脉内主值距离进行前移补偿和对距离频率进行后移补偿, 等效于将欺骗式干扰从方向图主瓣搬到旁瓣。然后, 借助奇异谱分析技术进行样本筛选以获得干扰协方差矩阵。最后, 利用自适应波束形成的方法对干扰进行抑制。仿真实验验证了所提抗干扰方法的有效性。

关键词: 主瓣欺骗式干扰抑制; 频率分集阵列多输入多输出雷达; 二次距离补偿; 奇异谱分析

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2022.09.09

Mainlobe deceptive jammer suppression with FDA-MIMO radar based on secondary compensation

ZHANG Yiqun, LAN Lan*, LIAO Guisheng, XU Jingwei

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The main-lobe deceptive jammers, which have the same angle as the true target, cannot be distinguished in the spatial domain with the traditional phased array radar system, reducing the performance of target detection seriously. To solve this problem, the method to suppress the mainlobe deceptive jammers based on secondary compensation is proposed with the frequency diversity array multiple input multiple output (FDA-MIMO) radar. Firstly, the forward compensation is performed to the principle range, and the backward compensation is implemented to the range frequency. Hence, the main-lobe deceptive jammers are equivalently moved to the sidelobes of the beam pattern. Then, the jammer covariance matrix is obtained by selecting the samples resorting to the singular spectrum analysis technique. Finally, the jammers can be suppressed with adaptive beamforming. The effectiveness of the proposed jammer suppression method is verified by simulation results.

Keywords: mainlobe deceptive jammer suppression; frequency diversity array multiple input multiple output (FDA-MIMO) radar; secondary range compensation; singular spectrum analysis

0 引言

在复杂电磁环境中, 雷达系统面临各种干扰, 严重制约其对目标信息的准确获取^[1-3]。常见的干扰类型包括压制

干扰和欺骗干扰, 其中欺骗干扰因其与目标相似性极强而难以抑制的特点被大量采用, 尤其当欺骗干扰位于波束主瓣内, 采用恒虚警(constant false-alarm rate, CFAR)技术无法检测出目标, 对雷达探测带来严峻挑战^[4-6]。目前, 针对

收稿日期: 2021-10-22; 修回日期: 2021-11-08; 网络优先出版日期: 2022-01-19。

网络优先出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220119.1010.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(62101402, 61931016, 62071344); 中国博士后科学基金(2021TQ0261, 2021M702547); 青年人才托举工程(2021QNR001); 雷达信号处理国家级重点实验室基金(JKW202104); 声纳技术重点实验室基金(6142109KF212202)资助课题

* 通讯作者。

引用格式: 张逸群, 兰岚, 廖桂生, 等. 基于二次补偿的 FDA-MIMO 雷达抗主瓣欺骗式干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2769-2775.

Reference format: ZHANG Y Q, LAN L, LIAO G S, et al. Mainlobe deceptive jammer suppression with FDA-MIMO radar based on secondary compensation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2769-2775.

主瓣欺骗式干扰,学者们从时域^[7]、频域^[8-9]、空域^[10-12]等开展了抗干扰研究。文献[13]借助盲源分离(blind source separation, BSS)技术对主瓣干扰进行滤除,但该方法前提是干扰和目标相互独立或者相关性较小,且需要额外的先验知识。另外,频率捷变是一种频域抗干扰的有效方法^[14],文献[15]利用脉冲重复频率抖动和频率捷变相结合的方式发射波形,使得雷达信号难以被截获,然而其不同脉冲间的信号相关性难以保证。传统空域自适应波束形成方法需要获得较为准确的干扰加噪声协方差矩阵,而在实际情况中很难实现。对此,文献[16-17]提出一种基于特征投影及波束赋形的主瓣干扰抑制算法,文献[18-19]基于特征投影矩阵和协方差重构算法对主瓣干扰进行抑制。然而,现有抗干扰方法大多基于传统相控阵雷达体制,其抗干扰效果具有一定的局限性。

频率分集阵(frequency diversity array, FDA)在相控阵基础上,在发射单元之间引入了一个很小的频率步进量,因此其发射导向矢量中包含目标的距离维信息,使得系统具有更高的自由度。通过结合多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术,可以通过空域自适应和非自适应波束形成方法有效抑制与真实目标具有距离差异的主瓣欺骗式干扰^[20-22]。进一步,通过对阵元和脉冲同时进行编码也可以有效对抗跨脉冲转发的主瓣欺骗式干扰^[23-26]。在 FDA-MIMO 雷达中,等效于在发射空间频率域进行干扰抑制。但此类方法的前提是干扰与目标位于不同的距离模糊区间^[27-30]。上述方法能够有效抑制位于下一个距离模糊区间的主瓣干扰,但对于脉内快速转发干扰的对抗能力有限。

本文基于 FDA-MIMO 雷达体制开展主瓣欺骗式干扰抑制方法研究。首先,对脉内主值距离进行前移补偿来抑制跨脉冲的干扰,再利用脉内真、假目标的距离频率差异进行后移补偿,将脉内快速转发的主瓣干扰搬移到旁瓣。然后,通过奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)方法挑选样本进行自适应波束形成,实现对主瓣欺骗式干扰的抑制。通过仿真实验验证所提抗干扰方法的有效性。

1 FDA-MIMO 信号模型

考虑在采用均匀线阵的共置 FDA-MIMO 雷达系统中,选取 M 个发射阵元和 N 个接收阵元,且各阵元间距为半波长。则第 $m(m=1, 2, \dots, M)$ 个发射单元发射出的信号可以表示为

$$s_m(t) = \sqrt{\frac{E}{M}} \text{rect}\left\{\frac{t}{T_p}\right\} \varphi_m(t) \exp\{j2\pi f_m t\} \quad (1)$$

式中: $f_m = f_0 + (m-1)\Delta f$ 表示第 m 个阵元发射信号的频率, f_0 表示载频, Δf 为发射阵元间的频率步进量;

$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T_p; \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ $\varphi_m(t)$ 表示信号波形。简单起

见,假设所有阵元在任意时间发射理想正交波形。

假设远场目标位于角度 θ , 距离 R , 则第 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 个接收天线阵元接收到的信号为

$$x_n(t - \tau_0) \approx \xi \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_p}\right) \cdot \sum_{m=1}^M \varphi_m(t - 2\tau_0) e^{j2\pi\Delta f(m-1)(t - \tau_{m,n}) + j2\pi f_0(t - \tau_{m,n})} \quad (2)$$

式中: ξ 表示回波信号复系数; $\tau_{m,n} = \tau_0 - \frac{(m-1)d \sin \theta}{c} - \frac{(n-1)d \sin \theta}{c}$, $\tau_0 = \frac{2R}{c}$ (c 为光速), d 为阵元间距。

接收信号混频后,首先对频率步进量相关项进行数字混频,再对发射波形进行匹配滤波^[5],则得到总的接收信号的矢量形式为

$$\mathbf{y}_s = [y_1(t, \theta_0), y_2(t, \theta_0), \dots, y_N(t, \theta_0)]^T = [\mathbf{b}(\theta_0) \otimes \mathbf{a}(R_0, \theta_0)] \quad (3)$$

式中: $y_n(t, \theta_0)$ 表示第 n 个接收阵元匹配滤波后的输出信号;符号 $\otimes$ 表示 Kronecker 乘积; $\mathbf{a}(R_0, \theta_0)$ 和 $\mathbf{b}(\theta_0)$ 分别表示接收和发射导向矢量,如下:

$$\mathbf{b}(\theta_0) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} \sin \theta_0}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} (N-1) \sin \theta_0} \right]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{a}(R_0, \theta_0) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} \sin \theta_0}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0} (N-1) \sin \theta_0} \right]^T \odot \left[1, e^{-j2\pi \Delta f \frac{R_0}{c}}, \dots, e^{-j2\pi \Delta f (N-1) \frac{R_0}{c}} \right]^T \quad (5)$$

式中:符号 $\odot$ 表示 Hadamard 乘积。

2 基于二次补偿的抗干扰原理

自卫欺骗式干扰机与目标位于同一角度,干扰机将截获的目标回波信号进行调制和延时后转发形成若干假目标,且其绝对位置落后于真实目标。根据转发时延的差异,若时延较大,假目标在下一个脉冲转发形成,此时可以根据真、假目标发射脉冲序号的差异进行鉴别;若时延较小,可根据真、假目标在脉内的距离差异进行鉴别。如图 1 所示,本方法主要面向脉内(I区)快速转发干扰。

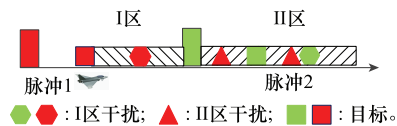


图 1 主瓣干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main-lobe interference

本节提出基于二次补偿的抗干扰方法。首先通过一次补偿(即前移补偿)抑制跨距离周期的转发式干扰;然后通过二次补偿(即后移补偿)的方式将脉内干扰搬移至旁瓣;最后,利用 SSA 的方法进行样本挑选,并借助自适应波束形成的方式对干扰进行抑制。

2.1 一次补偿(前移补偿)

根据目标发射和接收导向矢量的表达式,可以表示出其发射和接收频率为

$$f_{T,s} = -\frac{2\Delta f R_0}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (6)$$

$$f_{R,s} = \frac{d_R}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (7)$$

类似地,对于位于角度 θ_j 、距离 R_j 处的假目标,其发射和接收频率分别如下:

$$f_{T,j} = -\frac{2\Delta f R_j}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_j \quad (8)$$

$$f_{R,j} = \frac{d_R}{\lambda_0} \sin \theta_j \quad (9)$$

由于真、假目标角度相同,即 $\theta_j = \theta_0$,因此可根据其发射频率的距离分量的差异,即 $f_{s,r} = -2\Delta f R_0/c$ 与 $f_{j,r} = -2\Delta f R_j/c$,来对真、假目标进行区分。

针对跨周期的转发式干扰,即考虑距离模糊时,则真、假目标的实际距离可分别表示为

$$R_0 = R_a q_s + r_s \quad (10)$$

$$R_j = R_a q_j + r_j \quad (11)$$

式中: R_a 表示最大无模糊距离; r_s 和 r_j 分别表示真、假目标的脉内主值距离; q_s 和 q_j 分别表示真、假目标的距离周期数(即延迟的脉冲数)。

首先,构造补偿频率 $f_{c1} = 2r_a \Delta f/c$ 来补偿掉脉内距离频率,其中 r_a 为由距离门号和距离门大小决定的主值距离。因此,处于同一发射脉冲内所有目标的距离频率与脉内初始距离门所对应的距离频率相等,即实现了前移补偿。此时,在发射空域上不同目标对应的距离频率点由分散变为集中。具体而言,构造发射频率补偿矢量为

$$\mathbf{y}_1 = [1, e^{j2\pi f_{c1}}, \dots, e^{j2\pi f_{c1}}]^T \quad (12)$$

进一步,构造收发联合前移补偿矢量为

$$\mathbf{h} = \mathbf{I}_{N \times 1} \otimes \mathbf{y}_1 = [1, 1, \dots, 1]^T \otimes [1, e^{j2\pi f_{c1}}, \dots, e^{j2\pi f_{c1}}]^T \quad (13)$$

随后,利用收发联合补偿矢量对接收数据进行补偿,得到一次补偿后的数据为

$$\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{h} \odot \mathbf{z} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{z}$ 表示包含真实目标、欺骗式干扰与噪声的总接收数据。则补偿后真、假距离分别为

$$\tilde{R}_0 = R_a q_s \quad (15)$$

$$\tilde{R}_j = R_a q_j \quad (16)$$

式中: $\tilde{R}_0 - \tilde{R}_j = R_a q$, $q = |q_s - q_j|$ 为真、假目标延迟脉冲数的差值。相应地,补偿后的真、假目标发射空间频率分别表示为

$$\tilde{f}_{T,s} = -\frac{2\Delta f \tilde{R}_0}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (17)$$

$$\tilde{f}_{T,j} = -\frac{2\Delta f \tilde{R}_j}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (18)$$

因此,根据真、假目标的距离模糊数差异,可以对其在发射空间频率域进行区分。

2.2 二次补偿(后移补偿)

尽管采用前移补偿的方式能够区分真实目标与跨脉冲转发的欺骗式干扰,但仍无法区分脉内快速转发形成的假

目标。对此,可根据转发的假目标绝对距离大于真实目标这一特点,将真实目标之后的假目标进行空间频率后移补偿,使得假目标的距离频率与下一个脉冲起始点对应的距离频率相同,达到频率后移的效果,即实现后移补偿,如图2所示。其中,真实目标所在的距离门通过样本筛选技术得到。

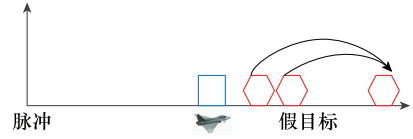


图2 二次频率补偿示意图

Fig. 2 Schematic diagram of secondary frequency compensation

具体而言,构造二次空间频率补偿矢量为

$$\mathbf{y}_2 = [1, e^{j2\pi f_{c2}}, \dots, e^{j2\pi f_{c2}}]^T \quad (19)$$

式中: $f_{c2} = -2R_a \Delta f/c$ 表示后移补偿频率。进一步,构建收发联合前移补偿矢量为

$$\mathbf{g} = \mathbf{I}_{N \times 1} \otimes \mathbf{y}_2 = [1, 1, \dots, 1]^T \otimes [1, e^{j2\pi f_{c2}}, \dots, e^{j2\pi f_{c2}}]^T \quad (20)$$

则补偿后的接收数据表示为

$$\hat{\mathbf{z}} = \tilde{\mathbf{z}} \odot \mathbf{g} = \mathbf{b}(\theta_0) \otimes \hat{\mathbf{a}}(R_0, \theta_0) + \sum_{j=1}^J \mathbf{b}(\theta_j) \otimes \hat{\mathbf{a}}(R_j, \theta_0) + \mathbf{n} \quad (21)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}(R_0, \theta_0)$ 和 $\hat{\mathbf{a}}(R_j, \theta_0)$ 分别表示补偿后的真实目标与第 j 个假目标的发射导向矢量。

$$\hat{\mathbf{a}}(R_j, \theta_0) = [1, \exp(j2\pi \hat{f}_{T,j}), \dots, \exp(j2\pi \hat{f}_{T,j})(M-1)]^T \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{a}}(R_0, \theta_0) = [1, \exp(j2\pi \hat{f}_{T,s}), \dots, \exp(j2\pi \hat{f}_{T,s})(M-1)]^T \quad (23)$$

式中: $\hat{f}_{T,s}$ 和 $\hat{f}_{T,j}$ 分别是二次补偿后目标和干扰的发射频率:

$$\hat{f}_{T,s} = -\frac{2\Delta f R_a q_s}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (24)$$

$$\hat{f}_{T,j} = -\frac{2\Delta f R_a (q_j + v)}{c} + \frac{d_T}{\lambda_0} \sin \theta_0 \quad (25)$$

由于 $q_s = q_j$, 则后移补偿后真、假目标存的空间频率差异为

$$\Delta f_{\text{dis}} = -\frac{2\Delta f R_a v}{c} = -\frac{\Delta f}{f_r} v \quad (26)$$

式中: v 为后移脉冲数; $\Delta f_{\text{dis}} = \hat{f}_{T,j} - \hat{f}_{T,s}$ 为接收空间频率差异。由于指数项存在 2π 的周期性,故在空间频率域产生差异仅取决于小数部分,如果小数部分存在差异,则真、假目标在空间频率谱上可分辨,且其区分度取决于假目标的后移脉冲数。此时,主瓣抗干扰问题转化为旁瓣抗干扰问题,随后可采用空域自适应波束形成的方式对干扰进行进一步的抑制。

2.3 SSA 样本挑选

经过二次补偿后,真、假目标在距离频率上能够区分,利用自适应波束形成技术对假目标进行抑制。然而实际

中,由于假目标的伪随机分布特性而不满足独立同分布条件,无法获取准确的干扰加噪声协方差矩阵,对此可借助 SSA 方法挑选合适的训练样本,得到干扰加噪声协方差矩阵。

根据各距离单元中的回波信息,可构建如下多元假设检验问题:

$$\begin{cases} H_0: \tilde{z} = s + w \\ H_1: \tilde{z} = w \\ H_2: \tilde{z} = j + w \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\tilde{z}$ 表示经过二次补偿后的单个距离单元回波; s 表示目标信号; w 表示噪声; j 表示干扰信号。 H_0 假设表示样本存在信号和噪声, H_1 假设表示只有噪声, H_2 假设表示干扰和噪声。为了挑选干扰加噪声样本,即 H_2 假设所对应的样本,按照如下两步骤进行:① 挑选奇异样本,即 H_0 假设与 H_2 假设所对应的样本;② 剔除含有目标的样本 H_0 假设,得到 H_2 假设所对应的样本。以下进行具体分析:

首先,根据二次补偿后的每个距离门的接收数据矢量 $\tilde{z}_l (l=1, 2, \dots, L, L$ 表示距离门个数) 构造矩阵 $\mathbf{Y} = \tilde{z}_l \tilde{z}_l^T$, 并对其进行奇异值分解,得到 G 个奇异值 $\lambda_g (g=1, 2, \dots, G)$ 。其次,依据虚警概率和概率密度函数设计门限 $\lambda_0^{[6]}$, 并逐个距离门进行比较,当 $\lambda_g > \lambda_0$, 即该距离门样本对应于 H_0 假设与 H_2 假设,由此可得到 κ 个奇异样本 $\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_\kappa$ 。最

后,依据假目标实际距离大于真实目标这一特点,将奇异样本中对应实际距离最小的样本剔除,即剔除目标对应的样本。此时,剩余 $\kappa - 1$ 个样本仅含有干扰加噪声,即 H_2 假设。

根据筛选出的样本构建干扰加噪声协方差矩阵为

$$\tilde{\mathbf{R}} = \frac{1}{\kappa - 1} \sum_{l=1}^{\kappa-1} \tilde{z}_l \tilde{z}_l^H \quad (28)$$

2.4 距离-角度二维自适应波束形成

最后,利用二维自适应波束形成实现干扰抑制。首先构造最小方差无失真响应 (minimum variance distortionless response, MVDR) 滤波器,即

$$\begin{cases} \min_w \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{u}}(R_0, \theta_0) = 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\mathbf{w}$ 为最优权矢量; $\tilde{\mathbf{u}}(R_0, \theta_0) = \mathbf{b}(\theta_0) \otimes \mathbf{a}(R_0, \theta_0)$ 为二次补偿后的目标虚拟导向矢量。随后,利用拉格朗日乘子法计算权矢量为

$$\mathbf{w} = \mu \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{u}}(R_0, \theta_0) \quad (30)$$

式中: $\mu = 1 / \tilde{\mathbf{u}}^H(R_0, \theta_0) \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{u}}(R_0, \theta_0)$ 。因此,经过二维自适应波束形成后,干扰由于距离维的失配而被抑制。基于二次补偿的自适应波束形成抗干扰方法总体流程如图 3 所示。

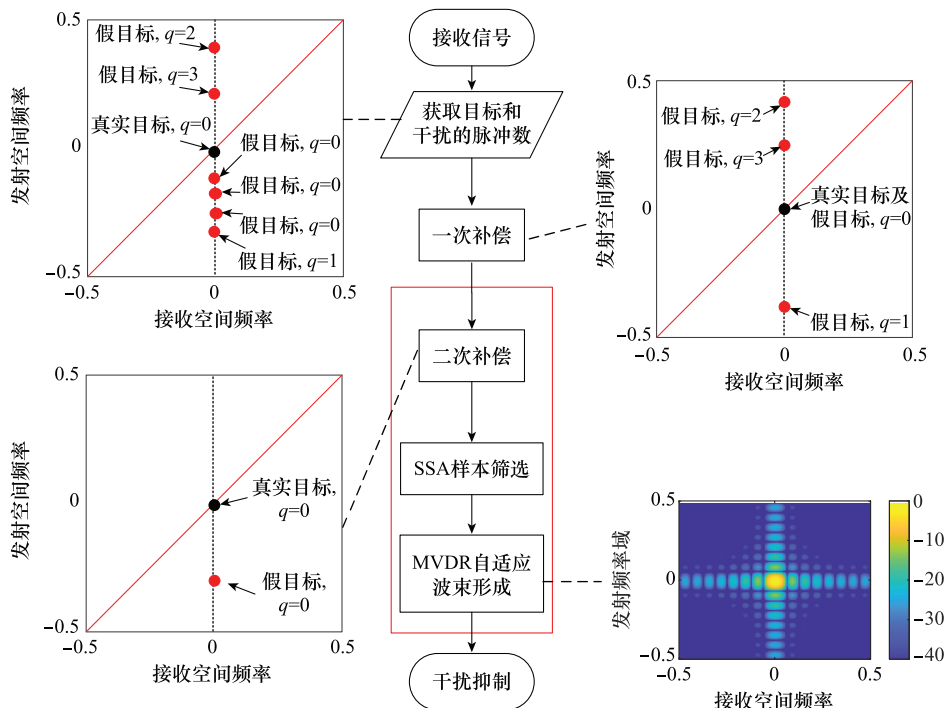


图 3 基于时延差异二次补偿的主瓣距离欺骗式干扰抑制流程图

Fig. 3 Flow chart of mainlobe distance deception jammer suppression based on time delay difference with secondary compensation

3 抗干扰的效能评估

雷达抗干扰效能进行评估。

(1) 输出信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR):

本节从能量、抑制率、信息熵 3 个方面对 FDA-MIMO

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{P_j + P_n} = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{j+n} \mathbf{w}} = \frac{\sigma_s^2 |\mathbf{w}^H \hat{\mathbf{u}}(R_0, \theta_0)|^2}{\mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w}} \quad (31)$$

式中： P_s 为信号功率； P_j 为干扰功率； P_n 表示噪声功率； $\mathbf{R}_{j+n}$ 表示干扰和噪声协方差矩阵； $\mathbf{R}_s$ 表示信号协方差矩阵； σ_s^2 为信号功率。

(2) 有源欺骗干扰抑制率

$$P_v = \frac{N_j}{N_{\text{all}}} \quad (32)$$

式中： N_j 表示被抑制掉的假目标数； N_{all} 表示有源欺骗干扰产生的假目标总数。该指标可反映已被抑制的假目标占比。

(3) 干扰信号熵

$$E_j = - \sum_{j=1}^{K-1} (p_j \log_2 p_j) \quad (33)$$

式中： p_j 表示干扰信号出现概率。该指标反映干扰信号的信息混乱度，混乱度越低，抗干扰效果越好^[31]。

4 仿真与分析

本节对抗干扰性能进行仿真分析。仿真参数如表 1 所示，其中包含干扰比(jammer to noise ratio, JNR)。假设自卫式干扰机产生了 4 个假目标，真实目标角度为 0°，干扰均来自主瓣。其中，目标处于第 300 个距离门，4 个假目标分别位于第 310、200、368、334 号距离门。其中，假目标 1 的距离模糊数与真实目标相同，假目标 2、假目标 3、假目标 4 相对于真实目标分别延迟了 2、2、3 个发射脉冲。

表 1 雷达仿真参数

Table 1 Simulation parameters of radar system

参数	取值	参数	取值
工作频率/GHz	16	脉冲重频/kHz	10
发射阵元数	16	接收阵元数	16
发射阵元间距/m	0.018 7	接收阵元间距/m	0.018 7
信噪比/dB	30	目标角度/(°)	0
假目标个数	4	主目标距离门	300
主目标距离数	0	假目标脉冲数	0, 2, 2, 3
假目标 1JNR/dB	45	假目标 1 距离门	310
假目标 2JNR/dB	25	假目标 2 距离门	200
假目标 3JNR/dB	20	假目标 3 距离门	368
假目标 4JNR/dB	30	假目标 4 距离门	334

图 4 为未进行抗干扰处理的接收数据输出。如图 3 所示，进行 CFAR 检测后出现了多个假目标，即虚警，且真实目标无法被检测出来，出现漏警。

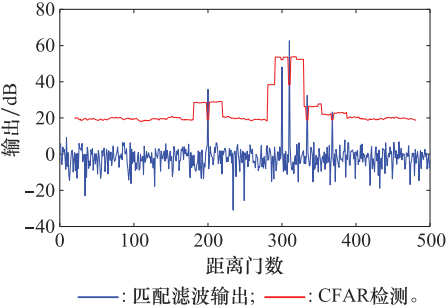


图 4 未经抗干扰信号输出
Fig. 4 Signal output without anti-jamming

图 5 给出了经过二次补偿前后的 FDA-MIMO 雷达收发二维功率谱。未补偿前，真、假目标接收空间频率保持一致，而发射频率有差异。经过一次补偿后，真、假目标在发射频率域上依据脉冲数聚集，即来自相同发射脉冲的假目标 1 和真目标聚集在同一点，来自相同距离模糊区的假目标 2 和 3 聚焦在同一点。经过二次补偿后，假目标 1 在发射空间频率上进行了平移，使得与来自于相同发射脉冲的真实目标发射空域上可分辨。此时，真实目标与假目标均可在收发二维空域上进行区分。

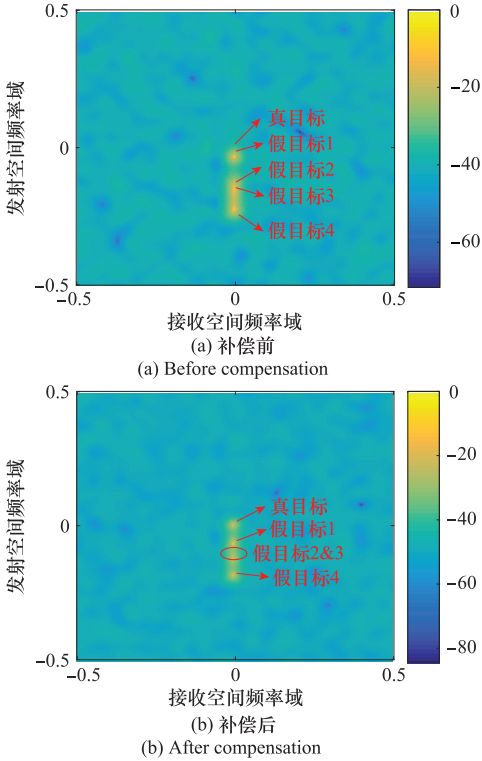
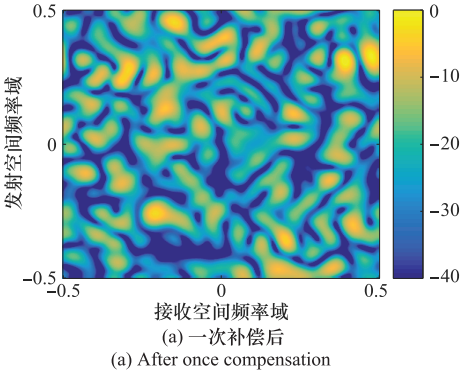


图 5 FDA-MIMO 雷达功率谱
Fig. 5 Power spectrum of FDA-MIMO radar

图 6 给出了一次补偿后和二次补偿后的波束形成方向图。如图 6(a) 所示，一次补偿后，由于仍存在脉内主瓣干扰，所以在主瓣方向有较大的零陷，产生了方向图畸变。如图 6(b) 所示，经过二次补偿及自适应波束形成后，脉内快速转发的主瓣干扰由于距离维失配而被抑制，因此方向图在真实目标处响应最大。



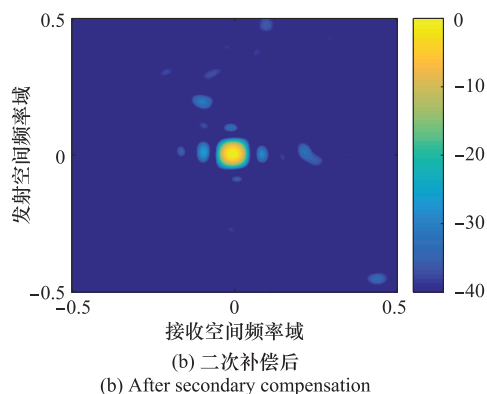


图 6 FDA-MIMO 雷达自适应波束形成方向图

Fig. 6 Adaptive beam pattern of the FDA-MIMO radar

图 7 为经过一次补偿后和二次补偿后的自适应滤波输出。由于一次补偿并不能分离假目标 1 和真目标,所以仍然存在干扰剩余。目标无法通过 CFAR 检测到,目标的输出功率很低,如图 7(a)所示。然而,经过二次补偿,目标和假目标 1 能够被有效分离,且利用自适应波束形成可以有效抑制假目标 1,只有真实目标被检测到,且具有最大的输出功率,如图 7(b)所示。

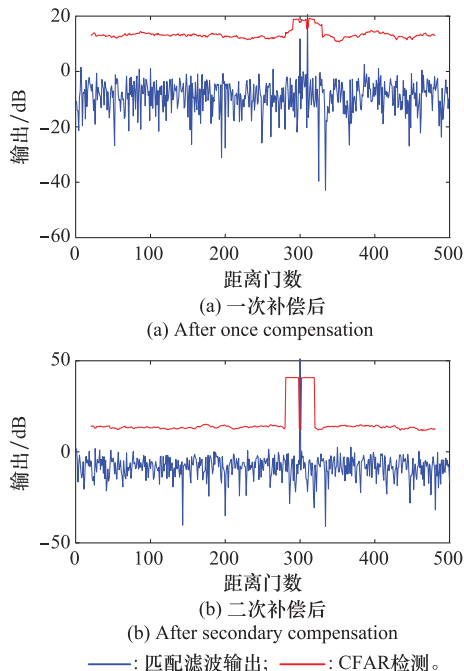


图 7 自适应滤波输出

Fig. 7 Adaptive filter output

图 8 为不同抗干扰策略的输出 SINR 曲线。其中,绿线为理想上界,蓝线为二次补偿并使用 SSA 样本挑选的输出结果,红线为二次补偿后采用传统挑选方法的输出结果,黄线为一次补偿结果。如图 8 所示,一次补偿后仍存在脉内快速转发的干扰,即在式 (31) 中,分母 $\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}$ 较大,故 SINR 很低。二次补偿后采用传统挑选方法由于没剔除目标,存在目标相消问题,因此输出 SINR 性能较差。二次补

偿后进行 SSA 样本筛选可得到较为准确的干扰加噪声协方差矩阵,避免了目标相消的问题,获得了较好的 SINR 输出性能,且接近理想上界。

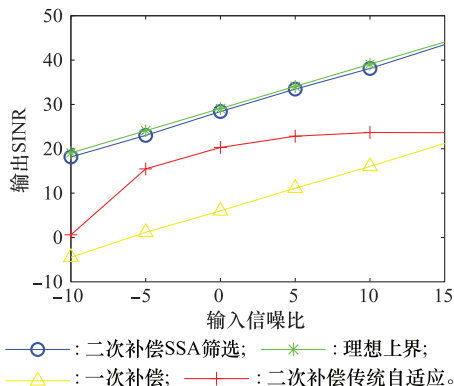


图 8 不同方法的输出 SINR 对比

Fig. 8 Comparison of output SINR in different methods

此外,一次补偿后干扰抑制率 $P_v = 75\%$,经过二次补偿以及自适应波束形成后上升至 100% ,有效对所有假目标进行了抑制。干扰信号的熵值未补偿前为 6.5,一次补偿后为 0.257 5,二次补偿后为 0,故抗干扰效果较好。

5 结 论

本文提出一种基于二次补偿的 FDA-MIMO 雷达主瓣欺骗式干扰抑制方法。首先依据延迟脉冲数差异和脉内距离差异构造补偿矢量,在发射空域上对真实目标和假目标进行区分,再使用 SSA 方法筛选奇异样本并剔除真实目标样本,从而获取准确的干扰噪声协方差矩阵,最后利用自适应波束形成滤波器对距离维失配的干扰进行抑制。

未来将针对 FDA-MIMO 多目标情况下的抗干扰以及灵巧干扰抑制问题开展研究,进一步提升 FDA-MIMO 雷达抗主瓣欺骗式干扰的能力。

参考文献

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
ZHAO G Q. Principles of radar conuntermeasures[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012.
- [2] HOU Y G, GAO H F, HUANG Q H, et al. A robust Capon beamforming approach for sparse array based on importance re-sampling compressive covariance sensing[J]. IEEE Access, 2019, 7: 80478 - 80490.
- [3] ZHENG Z, YANG T, WANG W Q, et al. Robust adaptive beamforming via coprime coarray interpolation[J]. Signal Processing, 2020, 169: 107382.
- [4] ZHANG Y M, AMIN M G. Array processing for nonstationary interference suppression in DS/SS communications using subspace projection techniques[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2001, 49(12): 3005 - 3014.
- [5] 兰岚, 许京伟, 朱圣棋, 等. 波形分集阵列雷达抗干扰进展[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(6): 1437 - 1451.

- LAN L, XU J W, ZHU S Q, et al. Advances in anti-jamming using waveform diverse array radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(6): 1437–1451.
- [6] 黄岩. 复杂电磁环境下合成孔径雷达活动目标检测与识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- HUANG Y. Research on techniques of moving target detection and recognition for synthetic aperture radar in complex electromagnetism environment[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [7] CHEN J, CHEN X L, ZHANG H G, et al. Suppression method for main-lobe interrupted sampling repeater jamming in distributed radar[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 139255–139265.
- [8] WEN C, PENG J Y, ZHOU Y, et al. Enhanced three-dimensional joint domain localized STAP for airborne FDA-MIMO radar under dense false-target jamming scenario[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(10): 4154–4166.
- [9] TANG Z Y, DENG Y K, ZHENG H F, et al. High-fidelity SAR intermittent sampling deceptive jamming suppression using azimuth phase coding[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(3): 489–493.
- [10] HAKOBYAN G, YANG B. High-performance automotive radar: a review of signal processing algorithms and modulation schemes[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, 36(5): 32–44.
- [11] AMIN M G, ZHAN L, LINDSEY A R. Subspace array processing for the suppression of FM jamming in GPS receivers[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 80–92.
- [12] ZHANG Z, YANG T, JIANG D, et al. Robust and efficient adaptive beamforming using nested subarray principles[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 4076–4085.
- [13] GE M M, CUI G L, KONG L J. Main lobe jamming suppression for distributed radar via joint blind source separation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(7): 1189–1199.
- [14] HUANG P H, DONG S S, LIU X Z, et al. A coherent integration method for moving target detection using frequency agile radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(2): 206–210.
- [15] QUAN Y H, WU Y J, LI Y C, et al. Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 348–352.
- [16] QIAN J H, HE Z S. Mainlobe interference suppression with eigenprojection algorithm and similarity constraints[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(3): 228–230.
- [17] DAVIS R M, FANTER L, GUELLA T P, et al. Interference suppression via operating frequency selection[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1999, 47(4): 637–645.
- [18] YANG X P, ZHANG Z G, ZENG T, et al. Mainlobe interference suppression based on eigen-projection processing and covariance matrix reconstruction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1369–1372.
- [19] ZHENG Z, ZHENG Y, WANG W Q, et al. Covariance matrix reconstruction with interference steering vector and power estimation for robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8495–8503.
- [20] WANG Y Z, ZHU S Q. Main-beam range deceptive jamming suppression with simulated annealing FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9056–9070.
- [21] LAN L, XU J W, LIAO G S, et al. Suppression of mainbeam deceptive jammer with FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2020, 69(10): 11584–11598.
- [22] 兰岚, 廖桂生, 许京伟, 等. FDA-MIMO 雷达非自适应波束形成抗主瓣欺骗式干扰研究[J]. *信号处理*, 2019, 35(6): 944–950.
- LAN L, LIAO G S, XU J W, et al. Main-beam deceptive jamming suppression with non-adaptive beam-forming in FDA-MIMO radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2019, 35(6): 944–950.
- [23] LAN L, LIAO G S, XU J W, et al. Mainlobe deceptive jammer suppression using element-pulse coding with MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2021, 182: 107955.
- [24] XU J W, ZHANG Y H, LIAO G S, et al. Resolving range ambiguity via multiple-input multiple-output radar with element-pulse coding[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2020, 68: 2770–2783.
- [25] XU J W, LIAO G S, ZHANG Y H, et al. An adaptive range-angle-Doppler processing approach for FDA-MIMO radar using three-dimensional localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 309–320.
- [26] 许京伟, 兰岚, 朱圣棋, 等. 相干频率分集阵列雷达匹配滤波器设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(8): 1720–1728.
- XU J W, LAN L, ZHU S Q, et al. Design of matched filter for coherent FDA radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(8): 1720–1728.
- [27] LAN L, LIAO G S, XU J W, et al. Transceive beamforming with accurate nulling in FDA-MIMO radar for imaging[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 4145–4159.
- [28] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Joint range and angle estimation using MIMO radar with frequency diverse array[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2015, 63(13): 3396–3410.
- [29] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9–17.
- [30] TAN M, WANG C Y, XUE B, et al. A novel deceptive jamming approach against frequency diverse array radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 8323–8332.
- [31] SHI S Y, CHAO L, HU J M, et al. Motion compensation for terahertz synthetic aperture radar based on subaperture decomposition and minimum entropy theorem[J]. *Sensors Journal*, 2020, 20(24): 14940–14949.

作者简介

张逸群(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为波形分集雷达、雷达抗干扰方法。

兰岚(1993—),女,特聘副教授,博士,主要研究方向为波形分集雷达、雷达抗干扰方法、MIMO 雷达技术。

廖桂生(1963—),男,教授,博士,主要研究方向为空时自适应处理、天基预警、多维度一体化波形设计、阵列信号处理。

许京伟(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为雷达系统建模、多通道阵列信号处理、空时自适应处理、波形分集雷达。