

频率分集阵列的 ISAR 成像技术<sup>\*</sup>施兴相<sup>1</sup> 廖可非<sup>1,2</sup>

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004;

2. 桂林电子科技大学卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心 桂林 541004)

**摘要:**频率分集阵列(frequency diversity array, FDA)在雷达探测与成像中具有很大优势。然而,当 FDA 应用于逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)时,FDA 的自动扫描特性成为了需要解决的关键问题之一。针对该问题,将 FDA 持续性聚焦跟踪波束技术应用到 ISAR 成像中,实现了高能量积累的 FDA-ISAR 成像。首先通过该技术向位于不同时刻不同角度的目标重复发射脉冲信号,然后对跟踪波束的回波进行相位补偿,最后采用快速傅里叶变换算法完成二维成像。仿真结果表明,使用持续性聚焦跟踪波束可获得能量叠加的增益效果,并且结合此技术的 FDA-ISAR 成像系统可实现对运动目标的二维成像。

**关键词:**逆合成孔径雷达;频率分集阵列;成像;持续性聚焦跟踪波束

**中图分类号:** TN957.53    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Inverse synthetic aperture radar imaging technology based on frequency diversity array

Shi Xingxiang<sup>1</sup> Liao Kefei<sup>1,2</sup>

(1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. State and Local Joint Engineering Research Center for Satellite Navigation and Location Service,

Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Frequency diversity array (FDA) has great advantages in radar detection and imaging. However, when FDA is applied to inverse synthetic aperture radar (ISAR), the automatic scanning characteristic of FDA has become one of the key problems to be solved. In order to solve this problem, this paper applies the FDA continuous focused tracking beam technology to ISAR imaging, and realizes the FDA-ISAR imaging with high energy accumulation. Firstly, pulse signals are repeatedly transmitted to targets at different times and angles through this technology, and then the echo of the tracking beam is phase compensated. Finally, the fast Fourier transform algorithm is used to complete two-dimensional imaging. The simulation results show that the gain effect of energy superposition can be achieved by using the continuous focusing tracking beam, and the FDA-ISAR imaging system combined with this technology can achieve two-dimensional imaging of moving targets.

**Keywords:** inverse synthetic aperture radar; frequency diversity array; imaging; continuous focus tracking beam

## 0 引言

由于阵列元件之间存在小频率偏移,频率分集阵列(frequency diversity array, FDA)可以产生与距离和角度相关的波束图。FDA 波束可以自动扫描整片区域,并估

计到目标的距离和角度<sup>[1]</sup>,进而对目标进行成像。其独特的距离-角度依赖性能够有效抑制多径传播的干扰,有助于提升低空目标检测性能<sup>[2]</sup>,加入重采样算法能实现能量的有效积累,进一步增强目标检测的性能<sup>[3]</sup>。FDA 可以发射出距离-角度耦合的波束,使其在目标探测和识别领

收稿日期: 2022-12-30

<sup>\*</sup> 基金项目: 广西自然科学基金(2021GXNSFAA220051)、广西创新驱动发展专项(桂科 AA21077008)、广西无线宽带通信与信号处理重点实验室基金、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2022YCXS055)资助

域有了较为突出的作用<sup>[4]</sup>。在其他方面如在现代频谱拥挤的环境中,FDA 能够更好的利用频谱资源,相较其他的雷达更具优势<sup>[5]</sup>。但是由于 FDA 空间波束具有时变性以及存在目标定位模糊和探测能量资源分配不均等问题,所以 FDA 在发展的过程中受到了一定阻碍。针对上述问题文献[6-7]提出时不变点状辐射波形,可引导波束聚焦并表现出比较高的调制效率。文献[8]则是通过结合阵列加权和分时段的波形设计,到达更自由的空间覆盖效果。文献[9]提出一种基于子空间分解的双边带去模糊成像方法。文献[10]通过分析 FDA 在多目标条件下成像模糊的原因,提出一种无模糊的随机频率增量约束判断准则,实现对多个目标的成像。文献[11]提出一种频率分集阵列去模糊成像方法,解决多目标定位模糊的问题。FDA 结合子阵结构划分和变换矩阵设计方法会有更好的抗干扰能力、能更准确的估计目标参数<sup>[12-13]</sup>。文献[14]针对 FDA 提出了一种基于分段式处理的角度-时间二维匹配滤波器回波接收方法,并构建了一种子脉冲时间窗的划分方法,但其主要应用于滤波器设计。文献[15]则在 FDA 雷达上提取雷达发射波束的有效时间段,并在极大程度上提高了发射能量利用率,有一定应用价值。另外,通过融合交替方向乘子法和阵列加权器方案,同样可以优化 FDA 雷达发射功率的分配和能量的使用<sup>[16-17]</sup>。除了 FDA,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)也具备一些独特的优势,相比于具有相同天线长度的常规雷达,SAR 的成像分辨率更高,SAR 融入形态学滤波和深度学习方法可以有效提高海面目标的检测精度<sup>[18-20]</sup>。连合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)主要用于非协作目标的成像,文献[21]在认知目标特征的基础上加入资源自适应调度算法,进而对目标进行稀疏孔径 ISAR 成像。文献[22]使用 Keystone 变换使 W 波段 ISAR 获得更好的运动补偿效果,ISAR 得到的图像对比度有了较大的提升。文献[23]提出时短傅里叶变换和多重信号分类谱估计联合算法运用到机动目标 ISAR 成像中,其拥有高分辨、误差小等特点。FDA 在 ISAR 中的应用对于二维欺骗干扰方面具有更高的效率和灵活性,并且容易对假目标进行控制<sup>[24-25]</sup>。相应的也出现了 FDA 结合 ISAR 的抗欺骗性技术,来对抗成像中的欺骗干扰<sup>[26-27]</sup>。虽然 FDA 可以完成对全场景的目标检测与成像,但是积累的能量会很低。特别是将 FDA 应用在 ISAR 中进行成像时,因为发射的波束并不能时刻对准动态变化的目标,所以雷达对运动目标的反射时间短、累积的反射能量弱。最终可能会造成雷达对目标跟踪不稳定、定位不准确或者丢失目标的结果。

为解决上述问题,本文引入一种持续性聚焦跟踪波束技术,并将其应用在 FDA-ISAR 成像系统上。持续性聚焦跟踪波束技术可以削弱 FDA 的自动扫描特性,使 FDA 波束具有指向性并完成目标的距离-角度解耦,从而提取

更多的目标特征信息,提供对运动目标成像的基础,这种方法也极大地提高了 FDA 对发射能量的合理利用。结合此技术,FDA 能更好的与 ISAR 结合。其联合体制可先通过持续性聚焦跟踪波束获得目标反射能量的累积,再通过相对运动获取方位向分辨率。雷达接收的回波信号首先会进行初相的补偿,使信号相参累加,然后再对阵元间存在的空间相位差进行补偿,最后通过快速傅里叶变换(FFT)算法得到运动目标的二维成像。最终,该成像方法弥补了 FDA 应用于 ISAR 系统时对运动目标探测跟踪和成像能力方面的一些不足,有一定应用价值,提高了 FDA-ISAR 系统的性能,采用持续性聚焦跟踪波束技术的 FDA-ISAR 可应用于海面舰艇的检测或空中飞行目标的成像。

## 1 原理

### 1.1 成像模型

基于持续性聚焦跟踪波束技术的 FDA-ISAR 模型如图 1 所示,对于稳定且平缓运动的飞行目标,可视目标为直线匀速前进运动,当目标不断地移动,雷达相对目标的观测角度也在变化并在不同角度发射脉冲信号。从频率分集阵列结构上来说,各阵元间的发射频率存在一个微小固定频率增量,根据此可获得第  $m$  个阵元的发射频率为:

$$f_m = f_0 + m\Delta f \quad m = 0, 1, \dots, K-1 \quad (1)$$

式中:  $K$  表示阵元的个数;  $f_0$  为初始阵元发射的载频;  $\Delta f$  是频率增量。并且初始载频  $f_0$  远大于任意倍数的  $m\Delta f$ 。第  $m$  个阵元发射的单频信号的复指数形式表示为:

$$S_m(t) = \exp(j2\pi f_m t) \quad m = 0, 1, \dots, K-1 \quad (2)$$

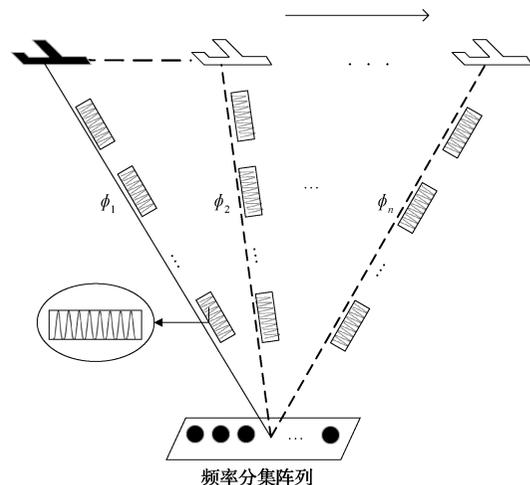


图 1 基于持续性聚焦跟踪波束技术的 FDA-ISAR 模型

目标在运动的过程中,可将其简化为小转角条件下已完成平动补偿的等效转台模型,在转台模型中的 ISAR 转动关系如图 2 所示。现以目标中心为原点建立直角坐标系  $xoy$ ,雷达与原点的距离为  $R_0$ ,在观测时间内,目标以角速度  $\omega$  匀速转动。假设有一目标散射点  $P_0$ ,其坐标为

$(x_0, y_0)$ , 点  $P_0$  到原点的距离为  $r_p$ , 与  $x$  轴夹角为  $\theta_0$ , 在下一个时刻, 散射点  $P_0$  将会移动到下一个新位置  $P_n$ , 坐标为  $(x_n, y_n)$ , 此时与  $x$  轴的夹角为  $\theta(t_n) = \theta_0 + \omega t_n$ , 则在  $t_n$  时刻散射点与雷达的距离  $R_p(t_n)$  可以表示为:

$$R_p(t_n) = \sqrt{[R_0 + r_p \cos(\theta_0 + \omega t_n)]^2 + [r_p \sin(\theta_0 + \omega t_n)]^2} \quad (3)$$

雷达射线到中心点  $O$  与雷达到散射点新位置的夹角  $\alpha_n$  存在如下几何关系:

$$\alpha_n = \arctan \left[ \frac{r_p \sin \theta(t_n)}{R_0 + r_p \cos \theta(t_n)} \right] \quad (4)$$

远场条件下, 式(3)中的第1个平方项要远远大于第2个平方项, 因此可将其化简为:

$$R_p(t_n) \approx R_0 + r_p \cos(\theta_0 + \omega t_n) = R_0 + x_0 \cos \omega t_n - y_0 \sin \omega t_n \quad (5)$$

已设条件为目标匀速平稳飞行, 转动角度  $\omega t_n < 5^\circ$ , 则三角函数可满足如下关系:

$$\begin{cases} \sin(\omega t_n) \approx \omega t_n \\ \cos(\omega t_n) \approx 1 \end{cases} \quad (6)$$

接着联立式(5)和(6)做进一步化简可得到:

$$R_p(t_n) \approx R_0 + x_0 - y_0 \omega t_n \quad (7)$$

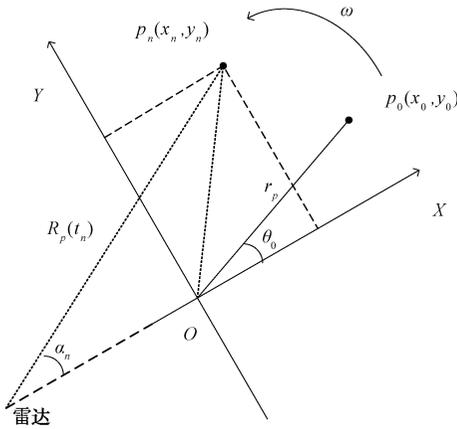


图2 ISAR 转动关系

FDA 的法线与远场某散射点到达阵元直线形成的初始夹角设置为  $\beta$ , 结合式(4)可获得阵列在  $t_n$  时刻的夹角为:

$$\varphi_n = \beta - \alpha_n \quad (8)$$

由不同时刻的夹角就可以得出不同时刻雷达相对于目标的视角。为获取更多目标回波的信息, 可以设置  $t_n$  时刻对目标观测一次, 共观测  $L$  次。根据式(3)在阵列中  $R_p(t_n)$  为  $t_n$  时刻某远场散射点到第1个阵元的距离, 则轮到第  $n$  次观测时, 第  $m$  个阵元到远场目标的距离为:

$$R_m = R_p(t_n) - md \sin \varphi_n \quad n = 0, 1, \dots, L-1 \quad (9)$$

式中:  $d$  为阵元间距。此时需截取出对该目标最有效用的主瓣时段, 需要截取的有效时段为:

$$T_e = \left[ \frac{k}{\Delta f} + \frac{R_p(t_n)}{c} - \frac{f_0 d \sin \varphi_n}{c \Delta f} - \frac{1}{K \Delta f}, \frac{k}{\Delta f} + \right]$$

$$\frac{R_p(t_n)}{c} - \frac{f_0 d \sin \varphi_n}{c \Delta f} + \frac{1}{K \Delta f} \quad (10)$$

式中:  $k$  是整数;  $c$  是电磁波在理想空间中的传播速度。

通过式(10)截取有效时段, 进一步利用其获得目标角度的指向性波束。对于不同时刻, 可以计算出与目标所在角度  $\varphi_n$  相关的初始相位为:

$$\Phi_n = 2\pi \left( \frac{k}{\Delta f} - \frac{f_0 d \sin \varphi_n}{c \Delta f} \right) \quad (11)$$

最后, 将有效时段  $T_e$  作为一个脉宽, 重复发射该时段信号, 通过控制初相 FDA 即可在不同方位发射持续性聚焦跟踪波束。

## 1.2 成像方法

FDA-ISAR 在不同的观察时刻、不同的观察方向上发射脉冲信号, 雷达与目标会产生相对位置的变化, 所以初始相位并不相同, 进而需要对目标回波的初相进行补偿, 便于后期回波信号的相干累加。此外, 对于远场目标, FDA-ISAR 在接收的回波中会由于各阵元存在的空间相位差, 成像时会出现散焦的情况, 目标主瓣会展宽, 目标点位置的精准度存在一定程度的下降。因此, 也需要对这个相位差进行补偿后, 再对回波信号相干累加。最后对距离向、方位向成像, 获得目标的二维图像。

首先接收回波数据。将不同时刻每个阵元发射的不同频率的信号全部接收, 则可接收到的所有时刻及不同阵元的发射信号的回波数据集为:

$$r(n, m) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{K-1} \exp \left\{ j2\pi (f_0 + m \Delta f) \left( t - \frac{R_p(t_n) - md \sin \varphi_n}{c} \right) \right\} \cdot \exp(j\Phi_n) \quad (12)$$

然后式(12)的回波信号进行初始相位的补偿, 得到补偿后的回波信号为:

$$r(n, m) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{K-1} \exp \left\{ j2\pi (f_0 + m \Delta f) \left( t - \frac{R_p(t_n) - md \sin \varphi_n}{c} \right) \right\} \quad (13)$$

雷达接收到的目标回波信号到第  $m$  个阵元存在的空间相位差为:

$$\Delta \psi = \frac{2\pi f_m}{c} \left\{ \sqrt{R_m^2 + (md \cos \varphi_n)^2} - R_m \right\} \quad (14)$$

再对回波信号进行相位差的补偿, 可得出用于成像处理的信号:

$$r(n, m) = \sum_{n=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{K-1} \exp \left\{ j2\pi (f_0 + m \Delta f) \left( t - \frac{R_p(t_n) - md \sin \varphi_n}{c} \right) \right\} \cdot \exp(-j\Delta \psi) \quad (15)$$

最后对式(15)处理后的回波信号的  $m$  做快速傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 得到一维的距离像, 进一步对  $n$  做 FFT, 最终在观测区域完成对目标的二维 ISAR 成像, 变换过程如下:

$$A(N, M) = FFT_n \{ IFFT_m [r(n, m)] \} \quad (16)$$

## 2 实验仿真

### 2.1 实验场景设计

为了验证所提 FDA-ISAR 成像方法的有效性,进行了基于 MATLAB 的仿真实验。实验场景的设计原则是目标小角度的转台成像,模拟在转台上匀速转动的目标,实验设计具备一般性,贴合 ISAR 实际成像场景。首先设置频率分集阵列的阵元个数  $K$  为 60 个,初始载频  $f_0$  为 10 GHz,频率增量  $\Delta f$  为 3.33 MHz,阵元间距  $d = 0.015$  m,脉冲重复频率为 400 Hz,对目标观测次数  $L = 500$ 。设置的场景如图 3 所示。

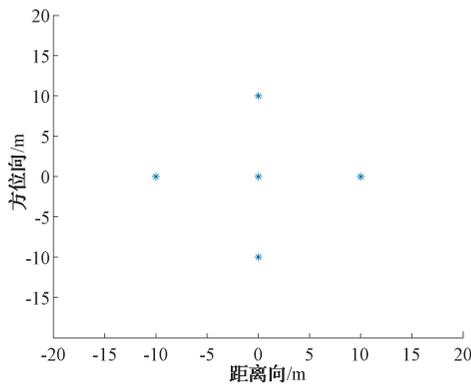


图3 目标场景

然后规划成像的区域,距离向范围为  $-20 \sim 20$  m,方位向范围为  $-20 \sim 20$  m。在成像区域分别设置 5 个点目标,在目标自己的视角中,以中心目标为原点,其他目标点则处在中心目标点的相对位置上。则中心目标点设置为  $(0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ,其余目标点分别设置为  $(0 \text{ m}, 10 \text{ m})$ 、 $(0 \text{ m}, -10 \text{ m})$ 、 $(10 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 、 $(-10 \text{ m}, 0 \text{ m})$ ,目标的散射系数均为 1。目标在理想转台模型中的转速为  $\omega = 0.02 \text{ rad/s}$ ,中心目标相距雷达  $5 \times 10^3 \text{ m}$ 。

### 2.2 成像仿真

使用本文所述的成像方法,经 MATLAB 软件处理后

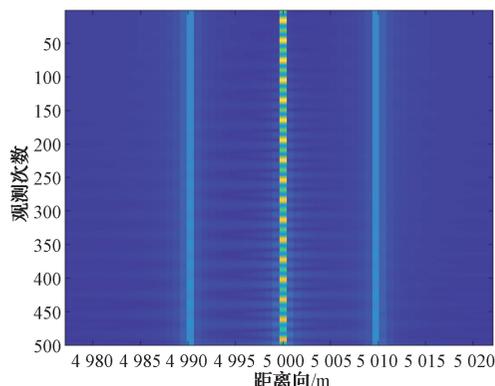


图4 一维距离向图

得到的图像如图 4 和 5 所示,从图 4 可以看到,目标点相对于雷达的距离可以很清楚地展现出来,但处于不同方位的目标还没有被区分出来。经过进一步的快速傅里叶变换处理后,最终形成的距离-方位二维图像,如图 5 所示,成像前设置的目标点经过成像仿真后没有发生缺失的状况。5 个位于不同方位不同距离的目标点已经可以很清晰地分辨出来,与其他非目标点位置形成明显的对比度,并且目标点间相对位置的定位精度也比较高。

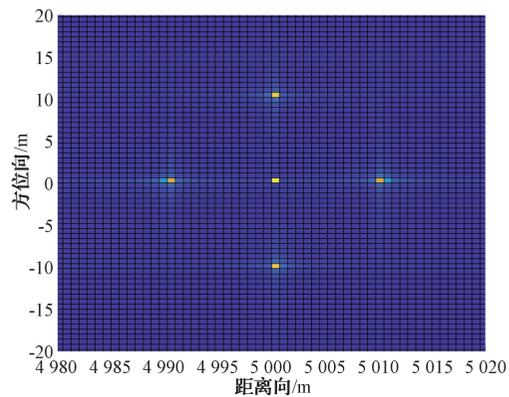


图5 二维成像图

为了更好的展示成像的效果,现在保持所设置的参数不变,去对比不同方法的成像结果。采用了传统的 FDA-ISAR 成像方法结果如图 6 所示,可以看出,目标幅值系数很低,单从图像上并不易察觉,表明累积的反射能量太少。采用结合持续性聚焦跟踪波束技术的 FDA-ISAR 成像结果如图 7 所示,可以看到各目标点的幅度都很高,表明雷达可累积到更多的反射能量。

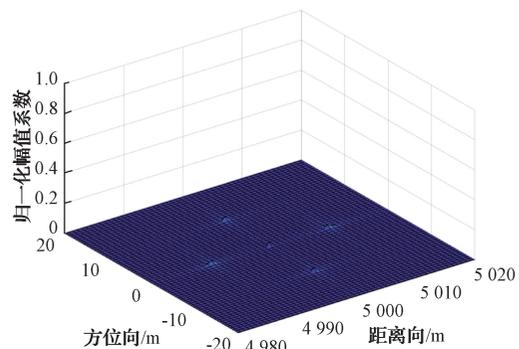


图6 采用传统方法成像结果

图 8 与 9 所示分别是两种方法在成像后,分别在方位向、距离向上做切片对比。图 8 给出了沿方位向的切片图,观察虚线部分切片图,其显示的方位的相对距离与仿真预设值是一样的。图 9 给出了沿距离向的切片图,沿距离轴可以看到 3 个目标点幅值最高处对应的距离与仿真的预设值也是相同的。说明经过傅里叶变换算法处理后,融入持续性聚焦跟踪波束技术的 FDA-ISAR 成像系统对目标定位的精准度还是比较高的。

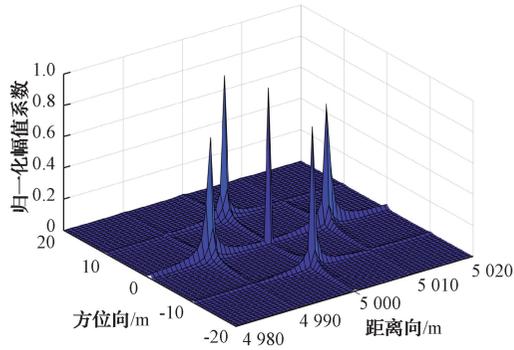


图7 采用本文方法成像结果

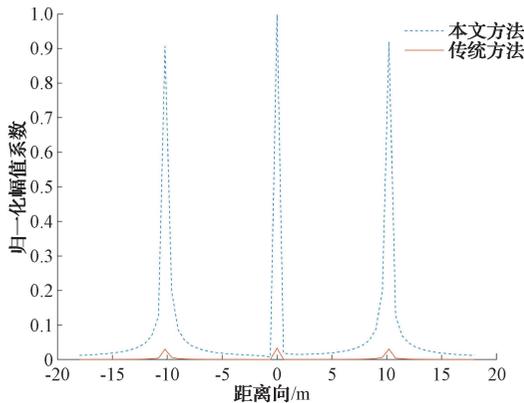


图8 方位向切片对比

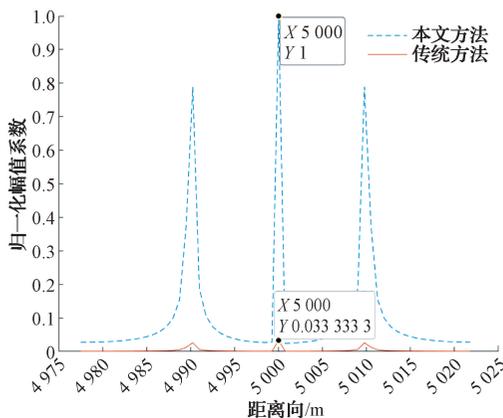


图9 距离向切片对比

结合图8和9可以更直观地看到,这两种方法在成像后积累反射能量的差距,二者的幅值系数大概相差30倍。造成这种现象的原因在于传统FDA-ISAR在单个周期内只包含一个有效主瓣能量,而结合本文方法的FDA-ISAR在单个周期内有 $K/2$ 个主瓣,所以累积的反射能量大概是传统FDA-ISAR的 $K/2$ 倍( $K$ 是阵元个数)。最终表明本文成像方法在累积反射能量的表现上是优于传统成像方法的。

### 3 结论

一般来说雷达对整个空域进行探测时,目标相对于整个巨大的活动空间来说,其总的分布是呈现稀疏状态的,特别是当线性频偏FDA发射的波束在整个探测区域自动扫描时,这种大规模空间目标搜寻,不仅造成能量的浪费,同时对目标的成像的反射能量积累造成了很大的影响。本文通过使用结合持续性聚焦跟踪波束技术的FDA完成对运动目标的ISAR成像,并保证不因FDA周期性自动扫描而损失成像能量的积累,在一定程度上提高了FDA-ISAR成像系统的实用性。结合持续性聚焦跟踪波束技术的FDA-ISAR成像系统,可实现反射能量的充分积累,从而精确的感知目标散射点的二维分布,利用快速傅里叶变换算法可完成对目标的距离-方位二维成像。最后通过仿真实验证明该成像系统的有效性,其能实现对运动目标的良好成像,对FDA-ISAR成像系统的运用也做了理论方面的指导。

### 参考文献

- [1] 王文钦,邵怀宗,陈慧. 频控阵雷达:概念、原理与应用[J]. 电子与信息学报,2016,38(4):1000-1011.
- [2] 程婕,王文钦,侯字典,等. 基于FDA雷达的多径干扰抑制及目标检测[J]. 信号处理,2022,38(1):28-34.
- [3] 张顺生,刘美慧,王文钦. 基于多普勒扩展补偿的FDA-MIMO雷达运动目标检测[J]. 雷达学报,2022,11(4):666-675.
- [4] LIU Y Z, MA Y H, JING H M. Detection performance analysis of the standard FDA and FDA-MIMO radar in the Gaussian background[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2021, DOI: 10.1155/2021/6001513.
- [5] JIA W K, JAKOBSSON A, WANG W Q. Designing FDA radars robust to contaminated shared spectra[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, DOI: 10.1109/TAES.2022.3221030.
- [6] MANEIRO-CATOIRA R, BRÉGAJNS J, GARCÍA-NAYA J A, et al. TMA-FDA range-angle beamforming with periodic linear-phase time-modulating waveforms[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(8): 1602-1606.
- [7] MANEIRO-CATOIRA R, BRÉGAJNS J, GARCÍA-NAYA J A, et al. A TMA-FDA approach for two-beam steering[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(10): 1973-1977.
- [8] YU L, HE F, SU Y. Transmitting strategy with high degrees of freedom for pulsed-coherent FDA radar[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2022, 16(4): 659.
- [9] 欧阳缙,李晶晶,谢跃雷,等. 双边带频率分集阵列雷

- 达系统及其目标定位方法[P]. 广西, CN106093926B, 2018-10-19.
- [10] LI J J, OUYANG SH, SUN X Y, et al. Ambiguity analysis for multitarget estimation using random permuted frequency diverse arrays[J]. *IEEE Access*, 2020(8):84680-84688.
- [11] LIAO K F, SHEN J F, OUYANG SH, et al. A target deblurring method for frequency diverse array imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(5):1002-1006.
- [12] 王博, 雷腾, 张君鹏, 等. 基于双程方向图的天线干扰性能分析[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(6): 12-20.
- [13] DING Z H, XIE J W, LI Z J. Adaptive transmit beamspace optimization design based on RD-log-FDA radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2022, 33(1): 91-96.
- [14] 许京伟, 兰岚, 朱圣棋, 等. 相干频率分集阵雷达匹配滤波器设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(8): 1720-1728.
- [15] WANG H L, LIAO K F, OUYANG S, et al. Focused tracking beamforming of frequency diversity array with multiple repeated subpulses[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2021, 15(4): 040502.
- [16] 巩朋成, 吴云韬. 基于 ADMM 改进的低截获 FDA-MIMO 雷达发射波束设计[J]. *通信学报*, 2022, 43(4): 133-142.
- [17] JIA W K, WANG W Q, ZHANG S S. Joint design of the transmit and receive weights for coherent FDA radar[J]. *Signal Processing*, 2022: 108834.
- [18] 吴鹏, 孙备, 苏绍璟, 等. 面向无人艇的航海雷达与光电吊舱协同环境感知方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(8):154-163.
- [19] 陈洋, 张明, 杨立东, 等. 一种基于改进 YOLOv4 的 SAR 舰船检测算法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(11): 120-125.
- [20] 胡欣, 马丽军. 基于 YOLOv5 的多分支注意力 SAR 图像舰船检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8): 141-149.
- [21] 陈怡君, 罗迎, 张群, 等. 基于认知 ISAR 成像的相控阵雷达资源自适应调度算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7):1566-1572.
- [22] 魏一搏, 王辉. W 波段 ISAR 包络对齐方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(9):43-47, 56.
- [23] 周子铂, 王鑫奎, 蔡万勇, 等. 联合时频分析和谱估计的机动目标 ISAR 成像[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(4):393-402.
- [24] HUANG L B, ZONG Z L, ZHANG S S, et al. Joint two-dimensional deception countering ISAR via frequency diverse array[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 773-777.
- [25] HUANG L B, ZONG Z L, WANG H, et al. Multi-targets deception jamming for ISAR with frequency diverse array[C]. *2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2019:2365-2368.
- [26] LI G M, ZHANG Q, LUO Y, et al. An anti-jamming method of ISAR Imaging with FDA-MIMO radar[C]. *2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2018: 490-493.
- [27] LIU Z D, LI K M, LUO Y, et al. An anti-jamming method against frequency diverse array for ISAR by spatial location feature recognition [C]. *2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2020: 1-4.

#### 作者简介

施兴相, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

E-mail:1002797384@qq.com

廖可非(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像及 RCS 测量。

E-mail:kefeiliao@guet.edu.cn