

## 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望

朱圣棋\* 余昆 许京伟 兰岚 李西敏

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 传统雷达存在主瓣欺骗式干扰难抑制、距离模糊杂波难分离等问题。一方面, 由于增加了发射维自由度, 波形分集阵列新体制的提出改变了雷达获取信息的方式。另一方面, 通过灵活的系统设计和信号处理方法, 增强了信息提取能力, 在抗干扰、检测等方面比传统相控阵、MIMO雷达有明显的性能提升。该文总结了波形分集阵列雷达的国内外最新研究进展, 分别从频率、时间和相位调制方式给出阵列分集体制的基本概念, 并对波形分集阵列雷达的研究趋势进行了梳理。在现有基础理论和关键技术研究的基础上, 验证波形分集阵列在提供目标新信息、增加系统额外可控自由度方面的优势, 提升了新体制雷达的多维探测能力。

**关键词:** 波形分集阵列; 发射维自由度; 频率分集阵列; 时间分集阵列; 阵元脉冲编码阵列; 抗主瓣欺骗干扰; 距离模糊杂波; 高分宽幅成像

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)06-0795-16

DOI: [10.12000/JR21188](https://doi.org/10.12000/JR21188)

**引用格式:** 朱圣棋, 余昆, 许京伟, 等. 波形分集阵列新体制雷达研究进展与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 795-810. doi: 10.12000/JR21188.

**Reference format:** ZHU Shengqi, YU Kun, XU Jingwei, *et al.* Research progress and prospect for the noval waveform diverse array radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 795-810. doi: 10.12000/JR21188.

## Research Progress and Prospect for the Noval Waveform Diverse Array Radar

ZHU Shengqi\* YU Kun XU Jingwei LAN Lan LI Ximin

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

**Abstract:** It is difficult for the traditional radar to suppress deceptive mainlobe interference and separate the range ambiguous clutter. The proposal of a waveform diverse array changes the way of obtaining information through utilizing degrees-of-freedom in the transmit dimension. Through flexible system design and signal processing methods, this array enhances the ability of information extraction and improves the anti-jamming and detection performance, compared with the traditional phased array and Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar. This paper summarizes the research progress of waveform diverse array radars in China and overseas and provides the basic concepts of the array diversity system regarding frequency, time, and phase modulation. Furthermore, the research trend of waveform diverse array radars has been discussed. Based on the existing basic theory and key technology research, the advantages of a waveform diverse array in providing new information about targets and increasing the additional controllable degrees-of-freedom of the system are verified, thereby improving the multidimensional detection capability of the new radar system.

**Key words:** Waveform Diverse Array (WDA); Degrees-of-freedom in the transmit dimension; Frequency Diverse Array (FDA); Time Diverse Array (TDA); Element pulse coding array; Suppression of mainlobe deception interference; Range ambiguous clutter; High resolution and wide swath imaging

收稿日期: 2021-11-24; 改回日期: 2021-12-23; 网络出版: 2021-12-28

\*通信作者: 朱圣棋 zhushengqi8@163.com \*Corresponding Author: ZHU Shengqi, zhushengqi8@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61931016, 62071344, 62101402, 61911530246), 陕西省杰出青年科学基金(2019JC-16), 中国博士后科学基金(2021TQ0261, 2021M702547)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61931016, 62071344, 62101402, 61911530246), The Excellent Youth Foundation of Shaanxi Scientific Committee (2019JC-16), The China Postdoctoral Science Foundation (2021TQ0261, 2021M702547)

责任编辑: 王文钦 Corresponding Editor: WANG Wenqin

## 1 引言

从机械扫描雷达到相控阵(Phased Array, PA)雷达直至多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达, 雷达系统对目标和环境的信息获取能力不断扩展, 系统可控自由度不断增加。波形分集阵列雷达是在此基础上又一次体制升级, 其各发射天线的信号在空间、时间、频率、极化以及调制方式上存在差异, 增加了雷达系统的自由度, 雷达可以更好地获取信息, 优化目标探测性能。

2004年美国电子电气工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineering, IEEE)组织召开“波形分集与设计”的国际会议, 在波形分集概念和理论方面开展了深入研究, 展示了波形调制在通信、雷达、声纳等领域的成果<sup>[1-4]</sup>。近年来, 波形分集受到国内外学者的广泛关注。IEEE雷达标准P686/D2(2008年1月)将波形分集定义为“能够为特定场景和任务动态优化雷达性能的雷达波形的适应性”。2007年IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing上出版关于波形分集的专题<sup>[5]</sup>。2009年IEEE Signal Processing Magazine发布了“波形捷变传感与处理”特刊<sup>[6]</sup>。国外麻省理工林肯实验室、华盛顿大学、新泽西研究所、佛罗里达大学和牛津大学等以及国内清华大学、北京理工大学、西安电子科技大学、电子科技大学、国防科技大学等已展开波形分集雷达理论和实验平台的研究。波形分集阵列发射调制带来了电磁波辐射特性的变化, 取得了一定的研究进展, 提升了雷达在检测、跟踪和抗干扰<sup>[7]</sup>等方面的性能。从波形分集雷达的技术实现上主要分为频分、时分、码分3种方式。

基于频分的波形分集技术——频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)概念最早由美国空军研究实验室Antonik等人<sup>[8]</sup>在2006年的IEEE雷达会议上提出。文献<sup>[9-12]</sup>对FDA进行了综述性的介绍。对FDA的研究包含了对发射方向图特性分析和信号处理层面上系统自由度的利用。在发射方向图特性方面, 部分学者探讨了FDA天线发射方向图随频率步进量、时间、距离的变化特性、距离-角度耦合问题及时变问题。文献<sup>[13-15]</sup>分析了FDA天线方向图的周期性、距离-角度依赖特性。国内外学者直接从发射端考虑解决目标距离-角度耦合问题, 通过采用对数频偏<sup>[16,17]</sup>、随机频偏<sup>[18]</sup>、汉明窗递减的频偏<sup>[19]</sup>以及采用智能算法<sup>[20-22]</sup>的方式进行非均匀频率步进量设计, 以实现发射方向图在目标处的能量聚焦以及干扰抑制。FDA天线发射方向图的时变问题, 可以通过脉冲体制<sup>[23]</sup>、凸优化算

法<sup>[24]</sup>实现准静态的发射方向图设计来实现。此外, 空军工程大学、海军航空大学等学者也对时不变方向图问题进行了分析<sup>[25,26]</sup>。在信号处理方面, 诸多文献探索了FDA新信息/新自由度的利用方法。文献<sup>[27]</sup>利用FDA距离维可控自由度对运动目标的参数进行无模糊估计, 文献<sup>[28]</sup>推导了FDA-MIMO雷达基于MUSIC的参数估计的性能表达式。文献<sup>[29]</sup>初步探讨了利用自适应二维波束形成对抗主瓣干扰的问题, 随后文献<sup>[30]</sup>做了改进, 分析了对抗跨周期的转发式欺骗式干扰的可行性。针对假目标伪随机分布问题, 提出接收主瓣方向的子空间投影和信号功率检测<sup>[30]</sup>、非奇异样本挑选<sup>[31]</sup>方法实现样本挑选。文献<sup>[32]</sup>考虑了非理想正交波形条件下的抗干扰, 基于距离-角度二维匹配滤波器来抑制由于距离维失配的假目标。此外, 电子科技大学、南京理工大学、空军工程大学等科研团队对基于波形分集的抗主瓣欺骗式干扰问题做了相关研究<sup>[33-36]</sup>。文献<sup>[37-40]</sup>研究了运动平台FDA-MIMO雷达在地海面杂波抑制和广域运动目标检测中的应用。文献<sup>[41]</sup>通过空时距离三维自适应处理方法, 综合利用空间角度、距离和多普勒三维信息进行自适应杂波与干扰的同时抑制。文献<sup>[42]</sup>提出了一种增强的三维联合域局域化STAP方法, 包括发射-接收空间频率域的欺骗式干扰预白化方法, 在存在强真实目标和重地杂波的情况下, 有效地提取不可预测的欺骗干扰样本, 提高雷达抗干扰性能。文献<sup>[43]</sup>提出了一种基于FDA的目标高分辨距离方位成像方法, 使雷达波束图不仅是角度的函数, 还含有距离信息, 通过协同收发波束形成实现了目标的距离角度成像。文献<sup>[44]</sup>提出了一种利用FDA距离维自由度实现高分辨宽测绘带成像距离解模糊方法, 解决了SAR成像测绘带宽对方位高分辨率的制约问题。本团队以复杂电磁环境下雷达主瓣干扰抑制的世界性难题为牵引, 揭示FDA雷达同时利用角度和距离信息分离目标与干扰的原理, 提出FDA雷达联合多维域信号处理方法, 突破雷达主瓣干扰抑制的难题。

基于时分的波形分集技术——时间分集阵列(Time Diverse Array, TDA)雷达通过在相邻阵元间引入时间延迟, 获得了空间和时间耦合特性, 仅需要一种波形即可实现全空域的覆盖, 而且不同阵元所发射的信号在时间上正交, 从而克服了传统的相干MIMO<sup>[45-48]</sup>雷达系统对发射波形正交性的限制。2013年Babur等人<sup>[49]</sup>将TDA与MIMO雷达相结合, 首次提出了时间分集空时编码阵列(Space Time Coding Array, STCA)的概念。文献<sup>[50-56]</sup>对STCA特性进行了研究。文献<sup>[49,51]</sup>指出STCA

通过引入时间延迟可以在广阔的空间覆盖范围内实现恒定增益。文献[52]对STCA的空域覆盖能力及其在距离上的分辨率做出了分析和验证,指出空域覆盖能力的提升是以降低距离分辨率为代价的。针对距离分辨率降低问题,文献[53]提出通过相位校正方法来降低距离副瓣。Babur等人[54,55]对STCA的性能进行了分析,详细推导了典型空时编码波形的模糊函数,并针对阵元发射波形间的互耦问题,提出在发射端的波束形成校准技术[56]。此外,STCA的许多应用已在文献[57–62]发表,包括数字波束形成、阵列校准、参数估计等。文献[58]在STCA的启示下,实现了在雷达目标检测工作模式下的方向图误差校正以及天线互耦的联合校正,简化了系统设计。文献[59]提出了一种扩展的恒定稀疏的循环码用于发射波束的合成。文献[60]详细推导了时间延迟与波束角覆盖范围之间的定量关系,提出了一种新的基于chirp-STCA的波束形成方法,从而使能量能够均匀地辐射到期望角区域。文献[61]在快拍不足和信噪比低的情况下,研究了基于STCA的波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计方法。本团队研究提出了一种基于发射维空间自由度的波束域超分辨率估计方法[63],通过设计角度-时间二维匹配滤波器,在接收端等效形成发射多波束,从而扩展系统的自由度,提高距离角度分辨性能,且工程上易实现。

基于码分的波形分集技术——编码技术已广泛应用于雷达信号的各种维度,包括快速时间维、空间维、脉冲维,以及它们之间的联合。通过研究二相码和多相码的最优自相关峰值旁瓣电平[64]和积分旁瓣电平[65]保持脉冲压缩信噪比;文献[66,67]采用脉冲间编码方式用于扩大合成孔径雷达的成像条带;方位向编码技术[68]、MIMO技术[69–71]用于SAR抑制距离模糊;文献[72]提出了一种阵元间的编码方式,可实现雷达、通信一体化系统的干扰抑制。最早研究的空时编码是基于通信系统的,然后应用于雷达系统的联合快时间维和空间通道维[73–76]以及联合脉冲维和阵元维[77]。实际上,空间或脉冲内引入相位编码项等价于调制发射脉冲内有关项频率,在波形分集研究工作中,我们提出了一种脉冲和阵元间的编码方案。基于MIMO体制提出了采用傅里叶基在联合发射阵元-脉冲维进行编码的新雷达框架[78],即阵元脉冲编码-多输入多输出(EPC-MIMO)雷达。研究表明,EPC-MIMO在发射空间频率域引入了新的自由度,可实现不同脉冲回波的分离。新自由度同时提升了雷达解距离模糊的能力,可实现目标角度和距离模糊数估计,且模糊数

识别能力与阵元数成正比。上述所提傅里叶基是以单调递增或递减的顺序加入到阵元和脉冲的,在无杂波环境下的编码方式可以是任意的[79]。文献[80]考虑利用EPC方法实现主瓣干扰抑制,制定了EPC-MIMO雷达编码系数设计准则,来区分不同模糊区内的真假目标,并通过非自适应波束形成实现了主瓣欺骗式干扰抑制。文献[81]研究了面对高分宽幅(High Resolution and Wide Swath, HRWS) SAR成像应用的编码方法,提出两种编码方案并对其在实际应用中的可行性与限制做了具体的分析。本团队利用EPC雷达阵元脉冲间发射灵活的优势,提出距离无模糊参数估计[78]和主瓣欺骗式干扰抑制[80]方法,未来可推广应用于星载高分宽幅成像[82]。

本文对波形分集阵列雷达的基本概念、研究现状和研究趋势进行了系统归纳与总结,重点介绍了本团队的研究进展,突破主瓣欺骗式干扰抑制和高分宽幅成像难题等关键技术,开展了波形分集阵列试验系统的研制,并进行雷达主瓣干扰抑制的初步实验验证。全文结构安排如下:第1节为引言;第2节介绍波形分集阵列雷达的基本概念,重点对3种主要的发射分集技术进行阐述;第3节从应用角度介绍本团队波形分集阵列雷达方面所提出的信号处理新方法,以及原理样机的研制与试验验证效果;第4节对波形分集阵列雷达技术难点与未来发展趋势进行展望。

## 2 波形分集阵列的概念

波形分集阵列常见形式包括对发射阵元进行频率调制构成的频率分集阵列(FDA)、对发射阵元进行时延调制形成的时间分集阵列(TDA)和对发射阵元沿慢时间进行相位调制形成的阵元脉冲编码阵列(EPC)。通过多样式的发射分集,实现发射波束灵活可控,可以最大限度地提高雷达资源的利用率,达到提升雷达系统性能、扩展雷达系统能力的目的。

### 2.1 FDA的基本原理与概念

考虑 $M$ 个阵元组成的一维等距线阵,FDA在各发射阵元上引入微小的线性频率变化,因此不同天线单元的发射频率可表示为

$$f_m = f_0 + (m - 1) \Delta f \quad (1)$$

其中, $f_0$ 为雷达的参考工作频率, $\Delta f$ 为远小于工作频率的频率步进量。阵元间距为 $d = \lambda_0/2$ ,其中 $\lambda_0 = c/f_0$ 为参考波长, $c$ 为光速。第 $m$ 个发射阵元的发射信号形式可以表达为

$$s_m(t) = \varphi(t) \exp\{j2\pi f_m t\}, -\frac{T_p}{2} \leq t \leq \frac{T_p}{2} \quad (2)$$



其中,  $\varphi(t)$ 表示各发射阵元的基带信号。在空间远场距离 $R$ , 角度 $\theta$ , 空间远场合成的信号可以表示为

$$F^{\text{FDA}}(t, \theta) = \sum_{m=1}^M \varphi(t) \exp \left\{ j2\pi f_m \left( t - \frac{R}{c} - \frac{d \sin \theta}{c} \right) \right\} \quad (3)$$

FDA相对于相控阵雷达在发射阵元上仅存在微小的频率调制。然而, FDA和相控阵的方向图却发生了本质的变化。采用表1的仿真参数, FDA和相控阵的方向图如图1所示, 方向图呈现S型, 在距离和空间角度产生耦合。利用耦合信息, 可获取发射端距离维可控自由度, 具有灵活的信号处理能力。可用于解决传统相控阵雷达难以实现抗主瓣欺骗式干扰、距离模糊杂波抑制等问题。

## 2.2 TDA的基本原理与概念

时间分集阵列雷达不同发射阵元发射的信号之间存在一定的时延差异, 因此TDA第 $m$ 个发射天线阵元的信号可以表示为

$$s_m(t) = \varphi(t - (m-1)\Delta t) \exp \{ j2\pi f_0 t \} \quad (4)$$

其中,  $-T_p/2 \leq t \leq T_p/2$ 。同样, 在空间远场距离 $R$ , 角度 $\theta$ , 空间合成的远区信号分布可以表示为

$$F^{\text{TDA}}(t, \theta) = \sum_{m=1}^M \varphi \left( t - (m-1)\Delta t - \frac{R}{c} \right) \cdot \exp \left\{ j2\pi f_0 \left( t - \frac{d \sin \theta}{c} (m-1) - \frac{R}{c} \right) \right\} \quad (5)$$

采用表2的仿真参数, 图2所示为TDA发射方向图。时延导致了不同时刻的发射端相位变化, 当时延等于带宽的倒数即 $\Delta t = 1/B$ 时, 相位在一个脉冲宽度时间的变化范围内刚好覆盖整个空间角度域。在FDA雷达中, 当 $\Delta f = 1/T_p$ 时, 由频偏带来的脉内空时耦合使波束扫描覆盖整个空域, 也可实现方向图全空域覆盖。因此, 可以认为TDA和FDA的发射方向图都具有距离角度耦合特性。与相控阵雷达相比, 无须预先对发射端进行相位调制, TDA阵列即可实现发射波束自动空域扫描。因此, 这种灵活的发射波束分集技术实现了波形分集体制雷达相比相控阵体制在获取目标信息方式上的转变, 可以增强雷达提取信息的能力。

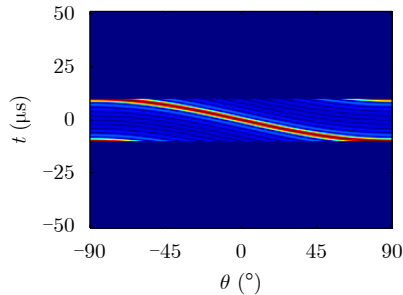
## 2.3 EPC的基本原理与概念

对各发射阵元进行相位调制可理解为对发射波束指向进行控制。阵元脉冲编码是一种在脉冲间对各发射阵元进行相位调制, 利用随慢时间时变的发射波束, 实现波形分集的技术。第 $m$ 个发射阵元发射的第 $k$ 个脉冲的相位编码信号可表示为

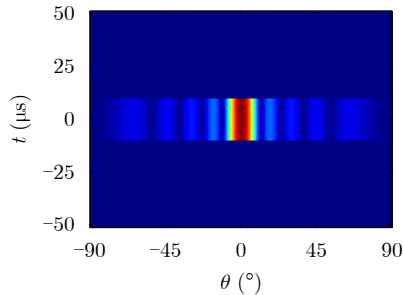
表 1 FDA和PA仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of FDA and PA

参数	数值	参数	数值
发射阵元数 $M$	10	带宽 $B$	20 MHz
脉宽 $T_p$	20 $\mu\text{s}$	采样率 $f_s$	30 MHz
载频 $f_0$	16 GHz	阵元间距 $d$	$\lambda_0/2$
频偏	$1/T_p$		



(a) FDA雷达  
(a) FDA radar



(b) PA雷达  
(b) PA radar

图 1 方向图对比

Fig. 1 Comparison of transmit pattern

表 2 TDA仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of TDA

参数	数值	参数	数值
发射阵元数 $M$	10	带宽 $B$	20 MHz
脉宽 $T_p$	20 $\mu\text{s}$	采样率 $f_s$	30 MHz
载频 $f_0$	16 GHz	阵元间距 $d$	$\lambda_0/2$
时延	$1/B$		

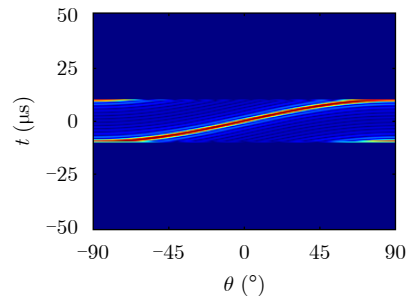


图 2 TDA发射方向图

Fig. 2 Transmit pattern of TDA

$$c_{m,k} = \exp\left(j2\pi\frac{(k-1)}{M}(m-1)\right) \quad (6)$$

假设远场( $R, \theta$ )位置处存在一点目标, 在阵元发射第 $k$ 个脉冲时, 空间合成的远区信号分布可以表示为 $F^{\text{EPC}}(t, k)$

$$\begin{aligned} &= \varphi\left(t - \frac{R}{c}\right) \\ &\cdot \sum_{m=1}^M \exp\left\{j2\pi f_0\left(t - \frac{d \sin \theta}{c}(m-1) - \frac{R}{c}\right)\right\} \\ &\cdot \exp\left(j2\pi\frac{(k-1)}{M}(m-1)\right) \end{aligned} \quad (7)$$

EPC等效发射波束示意图如图3所示, 多个连续脉冲发射波束, 可视为全空域覆盖。EPC和FDA, TDA同样具备灵活的发射波束, 可作为一种实现目标探测与跟踪多样化的新体制技术手段。

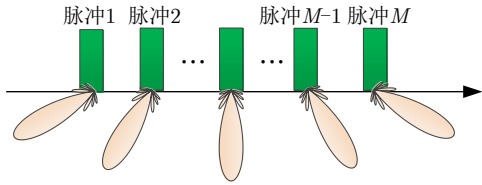


图3 EPC发射波束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transmit pattern for EPC radar

### 3 波形分集阵列雷达最新进展

现有波形分集阵列雷达的研究主要分为两类, 一种是结合MIMO技术, 另一种就是相干体制。在相干体制下, 接收端不能分离各个发射天线对应的信号, 波形分集体制的发射维信息得不到充分的利用。若要获得分离的发射信号, 则需要采用MIMO技术。目前已有的对于相干体制下的波形分集阵列的研究主要是基于匹配滤波方法的参数估计方法研究。

#### 3.1 距离角度二维联合处理的发射波束形成和匹配滤波

传统相控阵雷达在远场窄带假设下, 空域和时间域可以级联处理, 而时间分集阵列时域发射波形与空域导向矢量不能分离, 通过设计角度-时间二维匹配滤波器, 可以在接收端等效形成多发射波束, 获得发射端自由度, 实现距离维匹配滤波和发射波束形成<sup>[63]</sup>。经过下变频后的回波信号可表示为

$$\begin{aligned} &s\left(\theta, t - \frac{2R}{c}\right) \\ &= \sum_{m=1}^M \varphi\left(t - (m-1)\Delta t - \frac{2R}{c}\right) \\ &\cdot \exp\left\{-j2\pi f_0\frac{d \sin \theta}{c}(m-1)\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j2\pi f_0\frac{2R}{c}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

对接收信号进行 $M$ 路匹配滤波, 第 $i$ 路匹配滤波函数可构造为

$$\begin{aligned} s^*(\theta_i, -t) &= \sum_{m=1}^M \varphi^*\left(-t - (m-1)\Delta t\right) \\ &\cdot \exp\left\{j2\pi f_0\frac{d \sin \theta_i}{c}(m-1)\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\theta_i$ 为第 $i$ 个匹配角度, 即波束形成角度, 满足如下条件:

$$\sin \theta_i = -1 + 2(i-1)/M, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

在式(10)的约束下, 匹配滤波函数中的空域导向矢量可转化为离散傅里叶基的形式, 即 $\exp\{j2\pi mi/M\}$ , 其中,  $m = 0, 1, \dots, M-1, i = 0, 1, \dots, M-1$ 。因此,  $M$ 路匹配滤波可进行正交波束形成, 得到 $M$ 组正交波束进行全空域探测。

相干FDA体制下, 不同空间角度方向的散射点的回波包络和相位变化历程不同, 因此, 相干FDA雷达的匹配滤波函数是角度-时间的二维函数<sup>[83]</sup>。FDA的回波可表示为

$$\begin{aligned} &s\left(\theta, t - \frac{2R}{c}\right) \\ &= \varphi\left(t - \frac{2R}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j2\pi f_0\frac{2R}{c}\right\} \\ &\cdot \sum_{m=1}^M \exp\{j2\pi(m-1)\Delta ft\} \\ &\cdot \exp\left\{-j2\pi(m-1)\Delta f\frac{2R}{c}\right\} \\ &\cdot \exp\left\{-j2\pi(m-1)\Delta f\frac{d \sin \theta}{c}\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

为实现对空间任意点的匹配滤波, 需要对每个空间角度设计一个匹配滤波函数, 构造的匹配滤波函数为

$$\begin{aligned} &s^*(\theta_p, -t) \\ &= \varphi^*(-t) \sum_{m=1}^M \exp\{j2\pi(m-1)\Delta ft\} \\ &\cdot \exp\left\{j2\pi(m-1)\Delta f\frac{d \sin \theta_p}{c}\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

对于给定角度, 等效匹配滤波器受发射方向图的幅度和相位调制, 脉压积累时间仅为发射方向图主瓣对应的窗长。相干FDA的匹配滤波函数实际上是由基带波形和发射方向图共同决定的。如图4所示, 沿电磁波传播方向, TDA发射方向图沿距离维是时变的, 对于给定角度, 相干FDA有效的相干积累时间仅为发射方向图主瓣的持续时间。

需要说明的是, 当发射信号为线性调频信号时, FDA通过调整雷达发射脉冲的宽度或频率步进

量, TDA通过调整阵元间时延, 可以实现部分空间的覆盖, 调整雷达感兴趣的观测空域。相干FDA和TDA具有灵活的空间覆盖能力, 通过合理地设计系统参数和信号接收处理方法, 可大大提高雷达空间覆盖能力和效率, 具有重要的应用价值。

### 3.2 频率分集MIMO雷达抗主瓣欺骗式干扰

从干扰产生机理上讲, 多通道发射的信号在空间中线性叠加, 发射调制的信息在干扰机截获方是无法辨别的, 所以当干扰机产生虚假目标时, 只能利用截获信号进行时间的延迟和多普勒调制处理, 这在传统雷达体制下, 假目标和真实目标回波信号形式完全一致, 难以辨别。如图5所示, 首先在停拖期产生和真实目标相同距离单元的假目标, 假目标能量高于真实目标能量。其次在拖引期移动假目标所在距离单元, 欺骗雷达的跟踪波门跟随假目标。当真实目标和假目标距离很远时, 干扰机关机, 导致雷达跟丢目标, 进而再次转入搜索阶段。这是主瓣欺骗式干扰用于雷达跟踪阶段的典型示例。

捷变是通过“快变”降低干扰信号相参可能性, 保证目标信号相参积累增益。而分集思想是设计可辨识的调制信息, 用于在接收端获得信号和干扰的区分度。如图6所示, 频率分集阵列雷达是利用了雷达多天线之间频率的差异, 使得目标距离维信息表现为发射阵元之间的频率差异, 对不同距离

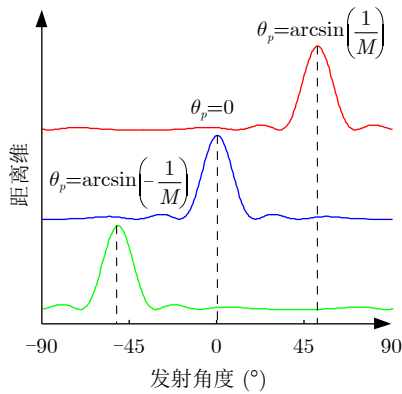


图 4 发射方向图随距离的变化关系

Fig. 4 The relationship between transmit pattern and range

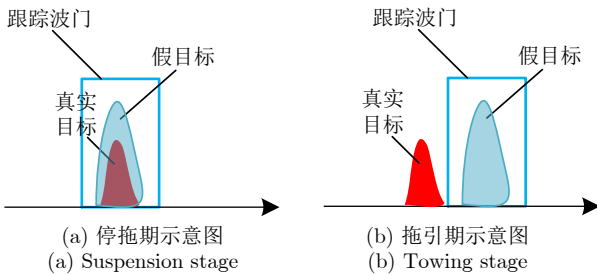


图 5 假目标产生示意图

Fig. 5 Schematic diagram of false target generation

的目标存在不同的相位差异。传统雷达在抑制主瓣干扰的同时目标也被抑制。本质上, 频率分集引入新的距离维信息和距离维可控自由度, 可形成距离-角度二维发射天线方向图, 在距离角度二维空间调零, 选择性抑制特定距离的回波, 从而抑制延迟转发的欺骗式干扰信号。

利用FDA雷达距离角度二维自由度, 在发射-接收二维域进行自适应波束形成, 约束真实目标的距离和角度二维信息, 从而抑制与真实目标信息距离角度信息失配的欺骗式干扰信号, 即使是主瓣方向的欺骗式干扰信号也会因为距离信息的失配被有效地抑制<sup>[84]</sup>。图7给出了FDA雷达基于非自适应波束形成抗主瓣欺骗式干扰结果。图7(a)给出了Capon谱分布, 可见真实目标由于收发频率相同, 因此沿主对角线分布, 而对于假目标, 与真实目标存在 $pR_u \cdot 2\Delta f/c$ 的发射频率偏差, 分布偏离主对角线。图7(b)给出了发射-接收二维非自适应波束形成器响应, 即二维方向图。图7(c)对比了不同方法FDA雷达的匹配滤波结果。FDA-MIMO雷达由于同时具有角度和距离维的自由度, 采用非自适应波束形成抑制假目标后, 预设的真实目标处会形成峰值。此外, 可以采用稳健的信号处理方法, 设计稳健波束形成器, 可克服小样本、阵列误差、估计误差等造成的波束形成器性能损失。

### 3.3 EPC-MIMO星载雷达高分宽幅成像

星载合成孔径雷达因其独特的全天时、全天候、全球对地成像能力, 在环境和灾害监测、军事侦察等领域得到高度重视。方位向高分辨率意味着较大的多普勒带宽, 需要以足够高的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)进行方位采样, 而宽测绘带无距离模糊要求采用低PRF。星载雷达高分宽幅成像矛盾在于对PRF的选择提出了截然相反的要求。笔者团队先后提出基于FDA-MIMO的SAR系统高分辨宽测绘带成像距离解模糊方法和基于空间-脉冲相位编码技术的HRWS-SAR成像新方法。

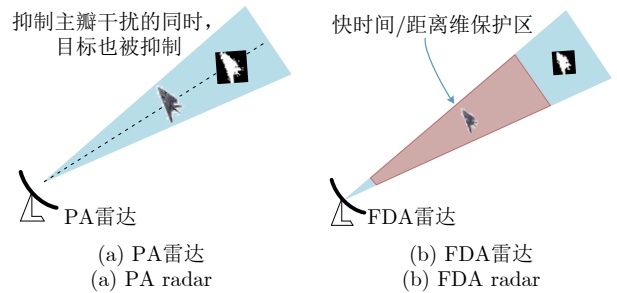


图 6 干扰抑制原理

Fig. 6 Principle of interference suppression

频率分集阵列发射导向矢量具有距离和角度二维依赖性，可表示为

$$f_s = f_R + f_a = -\frac{2\Delta f R}{c} + \frac{d_T \sin \theta}{\lambda} \quad (13)$$

其中， $f_R$ 为距离频率， $f_a$ 为角度频率， $R$ 为距离， $\theta$ 为方位角度。由于方位角度的不同，相距 $R_n$ 的距离模糊目标，其空间频率相差

$$\Delta f_s = \frac{2\Delta f R_n}{c} = u + q \quad (14)$$

其中， $u \in \mathbb{N}$ 为整数部分， $q \in [0, 1]$ 为小数部分。FDA-MIMO雷达通过形成距离依赖的发射方向图，因此不同距离的目标在空间频率域完全重叠，如图8所示。

由于采用正交波形，对原始数据进行匹配滤波可恢复FDA的发射自由度。进行接收波束形成以及距离依赖性补偿，使回波信号在空间频率域区分开。通过对补偿后的数据进行发射波束形成，实现对距离模糊信号的抑制，从而提取各距离区域的回波信号。对其进行传统成像处理即可得到无距离模糊的高分辨宽测绘带SAR图像<sup>[85]</sup>。

采用空间-脉冲相位编码技术解决高分辨宽测绘带成像距离解模糊<sup>[82]</sup>，首先，通过仿真模拟计算确定SAR系统参数，并基于所确定的距离区域覆盖数来设计良好的编码方案。其次，根据所设计的编码方案，沿着慢时间对每个发射通道所发射的脉冲进行相位编码。发射阵元和脉冲间采用如图9(a)所示一般编码方式。此外，还可采用一种更灵活的编码方法，如图9(b)所示，通过对编码相位矩阵的优化设计，可获取更好的模糊杂波分离效果。

对接收到的回波数据做匹配滤波处理，将不同发射通道的发射脉冲所对应的回波进行距离匹配滤波并分离发射信号。针对每个距离区域的回波数据分别进行解码操作，可得到对应不同距离区域的  $P$  组回波数据。利用解码后的回波数据进行发射波束形成，分别提取出不同距离区域的主瓣回波数据，如图10所示。采用传统的 SAR 成像算法对所提取的主瓣回波数据进行成像处理，便可得到由各个距离区域SAR图像所组成的HRWS-SAR图像。

### 3.4 频率分集MIMO雷达杂波抑制

高速平台前视阵雷达在动目标检测过程中面临强大的杂波干扰，一方面，前视阵雷达杂波具有显著的距离依赖性，近程与远程杂波分布特性差异较大；另一方面，由于平台高速运动导致主杂波严重扩展，雷达需提高脉冲重复频率(PRF)来降低杂波多普勒模糊，但这将导致杂波发生多重距离模糊，如图11所示。因此，当二者同时存在时，近程杂

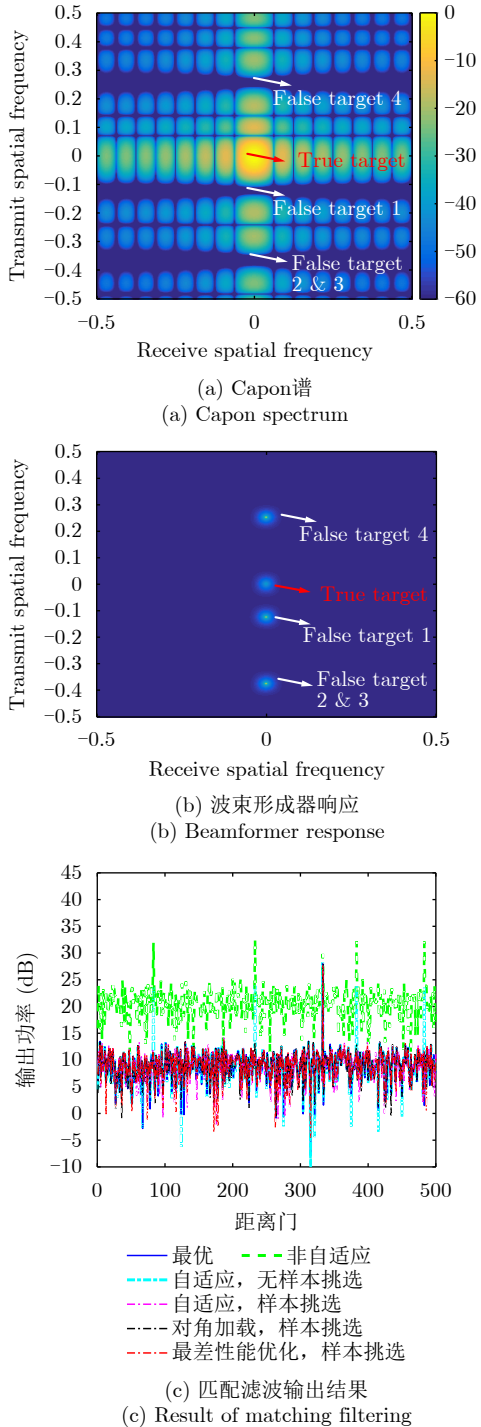


图7 FDA雷达主瓣欺骗式干扰抑制结果

Fig. 7 Suppression results of deceptive interference in the mainlobe with FDA radar

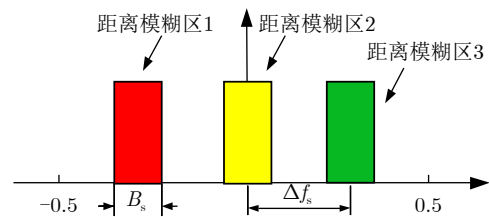
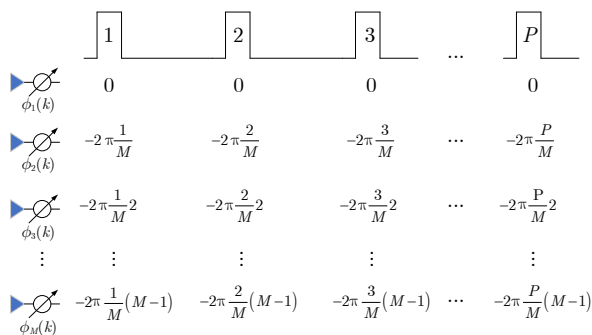


图8 FDA雷达距离模糊信号的空间谱

Fig. 8 Spatial spectrum of range ambiguous signals for FDA radar





(a) 一般编码方法  
(a) General coding method

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & c_{1,K} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{M,1} & c_{M,2} & \cdots & c_{M,K} \end{bmatrix}$$

(b) 优化编码设计  
(b) Optimized coding design

图 9 EPC相位编码方案

Fig. 9 Phase coding scheme for EPC

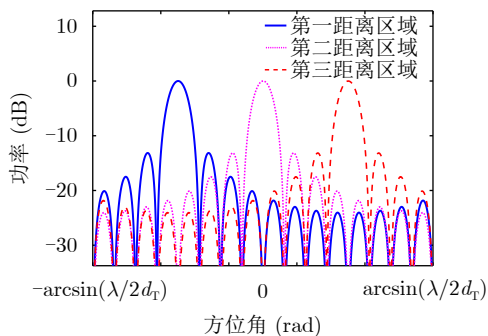


图 10 距离模糊回波分离方法

Fig. 10 Separation method for range ambiguous echo

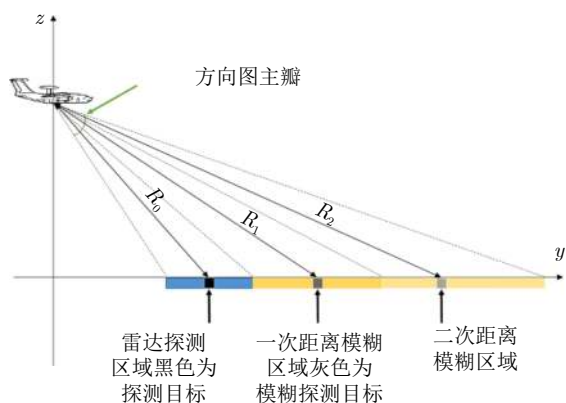


图 11 机载雷达距离模糊杂波区域几何示意图

Fig. 11 Geometric configuration of range ambiguity clutter for airborne radar

波与远程杂波相互叠加，雷达杂波抑制性能将严重下降。

FDA雷达通过在阵元之间引入微小的载频偏移，等效地在发射端引入了随时间变化的发射权值，能够形成角度、距离、时间依赖的发射方向图，利用该距离角度依赖的方向图来改善距离模糊的STAP算法，通过距离维自由度分离不同距离的模糊杂波，再在发射方向图形成零陷来抑制距离模糊的杂波回波，最后通过传统杂波补偿算法对齐观察区域的距离依赖性杂波<sup>[39-41]</sup>。传统相控阵雷达目标淹没在近程杂波中，无法检测到，如图12(a)和图12(c)所示。在FDA雷达中，利用FDA距离角度耦合特性，将近程杂波平移到两端，从而避免近程模糊杂波对目标检测的影响，如图12(b)和图12(d)所示。

图13给出了杂波抑制改善因子随多普勒的变化曲线。由图13可见，对于传统相控阵雷达改善因子性能在模糊距离区主瓣杂波和无模糊距离区主瓣杂波的性能下降严重。FDA雷达中，由于杂波在空间频率域实现了分离，因此对于无模糊距离区目标检测，改善因子仅在无模糊距离区主瓣杂波处存在凹口。FDA距离模糊杂波抑制方法，利用频率分集阵列发射导向矢量的距离角度依赖性，在空间频率域可以有效地分离距离模糊杂波。将杂波分离技术与传统杂波谱补偿方法相结合，显著提升了距离模糊杂波抑制的性能。由于FDA雷达能够在空间频率域将无模糊距离区杂波与模糊距离区杂波分开，因此能有效提高非均匀杂波抑制性能。

### 3.5 波形分集阵列雷达原理样机试验验证

为了对波形分集阵列雷达的相关技术进行演示与验证，本团队自主开展了波形分集阵列雷达原理样机研制，如图14所示，解决多通道波形产生、雷达发射机频率步进信号调制、多通道独立基带包络信号调制以及多通道信号接收机高速数据采集、缓存、传输、存储等问题。采用上位机+系统逻辑控制器的研制方案，实现系统配置、多种工作模式灵活控制。研制了多通道发射-接收射频组件与天线系统，设计了多通道发射与接收的校正网络。实测数据处理表明该部雷达实现了杂波抑制、动目标检测和抗主瓣欺骗式干扰等功能。在西安电子科技大学南校区，搭建了波形分集阵列雷达试验场，开展了雷达外场/内部校正、抗主瓣干扰试验、抗多样性干扰试验。如图15所示，实验设备包括一部架设在高楼上的雷达原理样机，装载在运动汽车上的主瓣欺骗式干扰机以及位于旁瓣的干扰站。实际外场测试场景如图16所示。试验的雷达参数如表3所示。

目前该部雷达具备相控阵、普通MIMO和EPC这三种发射模式。由于实际地理环境中高楼比



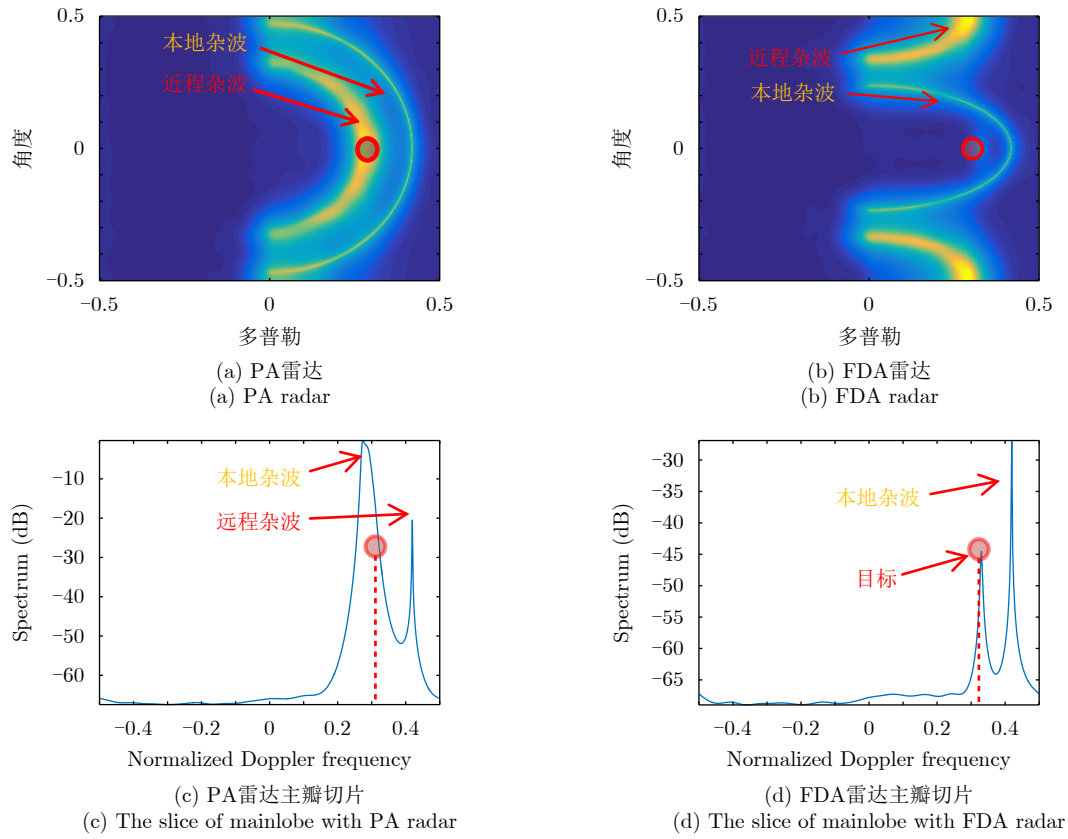


图 12 距离模糊杂波功率谱示意图

Fig. 12 Power distribution of range ambiguity clutter

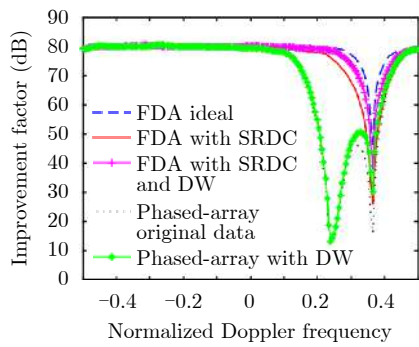


图 13 杂波功率谱IF曲线

Fig. 13 IF curve of clutter power spectrum



(a) 射频天线  
(a) RF antenna  
(b) 假目标产生器  
(b) False target generator

图 14 原理样机组成部件

Fig. 14 Components of principle prototype

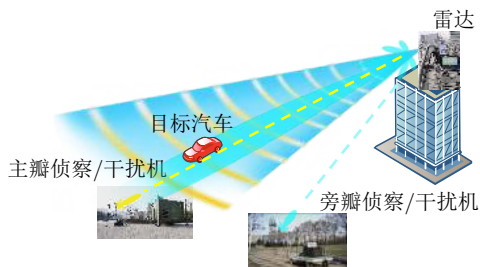


图 15 外场试验场景及要素

Fig. 15 Experiment scenarios and elements



图 16 实际外场测试场景

Fig. 16 Scenario of the actual outfield experiment

表 3 雷达系统参数  
Tab. 3 Parameters of radar

参数	数值	参数	数值
收发通道数	16	带宽 $B$	50 MHz
脉宽 $T_p$	2.5 $\mu$ s	采样率 $f_s$	200 MHz
载频 $f_0$	9.5 GHz	阵元间距 $d$	$\lambda_0/2$

较多，杂波回波能量较强且沿距离单元分布不均匀。如图17所示，强杂波沿距离维成块出现，本次实验中杂波主要集中在400~1200 m以及1800~2500 m两块区域，在其他区域可近似看成是噪声。通过对比各种体制杂波抑制前后的结果，杂波

均得到较好的抑制，说明了EPC雷达和PA, MIMO雷达一样具备杂波抑制和动目标检测能力。但由于不同体制下目标输出功率不同，对波形分集阵列雷达和传统体制的杂波抑制性能对比，有待进一步研究。

通过装载在目标上的欺骗式干扰机，产生时延和多普勒调制的假目标。设置雷达工作模式为相控阵模式、MIMO模式和EPC模式，录取真实运动目标与地物杂波回波加干扰信号的实测数据。对实测数据进行MTD和抗干扰处理，观察抗主瓣干扰效果，如图18所示。实测数据处理表明，EPC模式下可实现主瓣欺骗式干扰有效抑制，与PA雷达或MIMO雷达相比，干扰抑制性能提升50 dB。

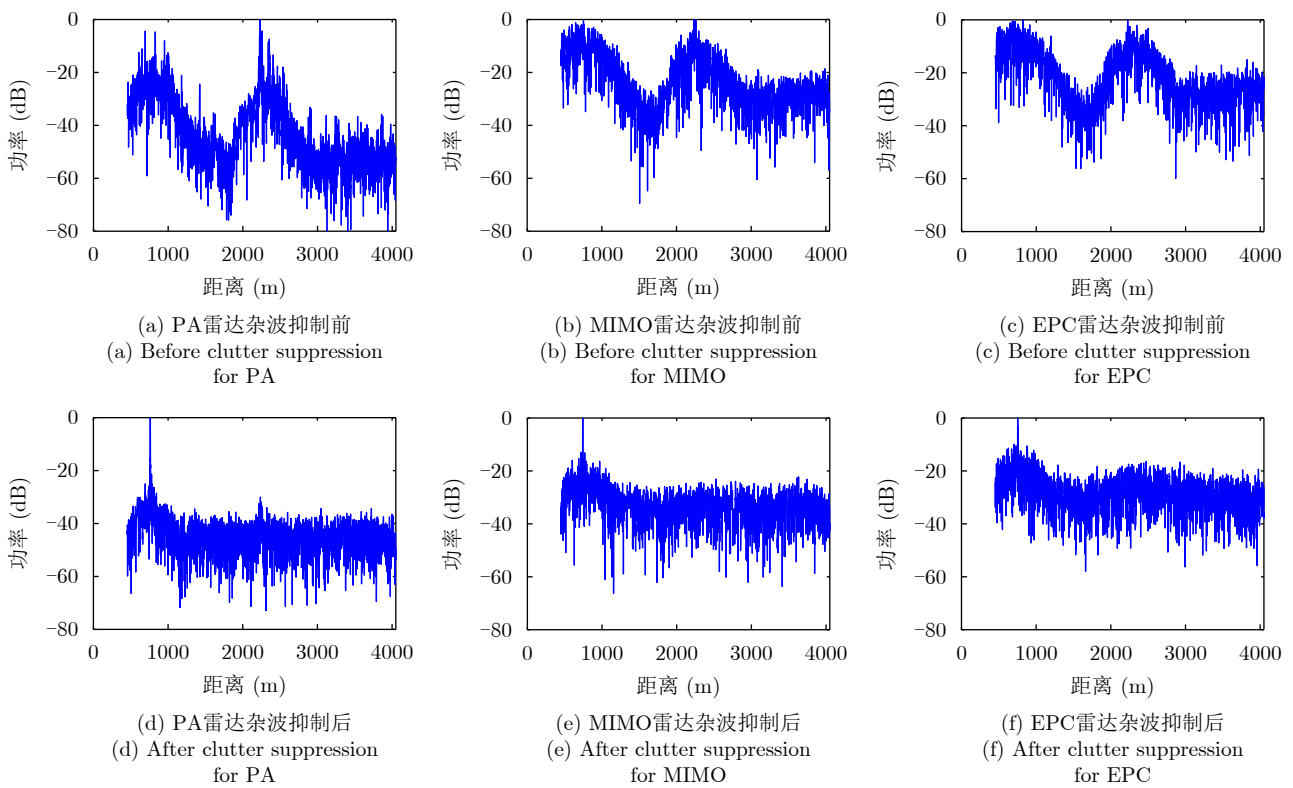


图 17 杂波抑制结果

Fig. 17 Results of clutter suppression

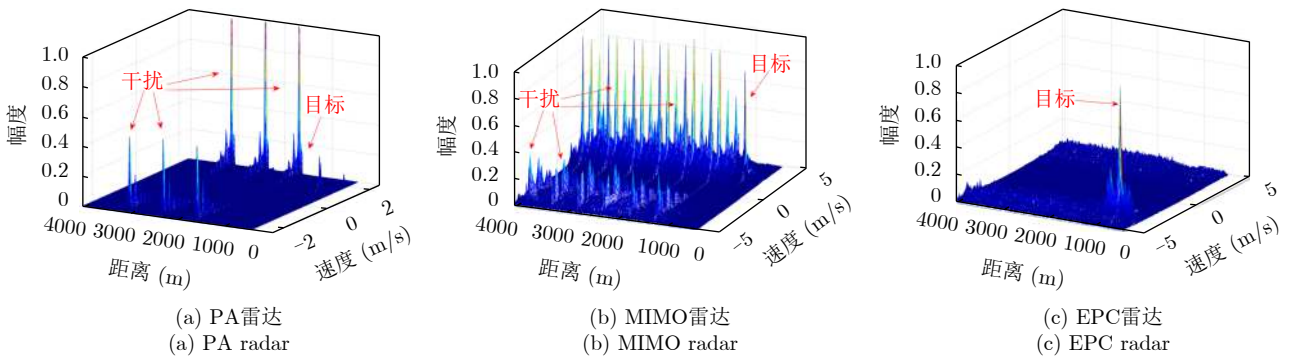


图 18 干扰抑制结果

Fig. 18 Results of interference suppression

## 4 波形分集阵列雷达发展趋势与应用展望

波形分集阵列雷达增加了发射维系统自由度,在抗干扰、检测等方面比传统相控阵/MIMO雷达性能更优,是雷达体制演化的一个重要方向,具有重要的研究意义。结合现有波形分集的部分研究进展,笔者认为在以下几个方面仍需开展进一步的研究工作。

### 4.1 波形分集阵列雷达方向图调控

波形分集体制的发射方向图与相控阵雷达不同,具有全/部分空域覆盖特性,不同的波形分集体制波束也有差异,比如FDA和TDA具有距离依赖特性,而EPC不依靠距离角度耦合即可实现发射分集。通过设计接收端的角度-时间二维匹配滤波器,在接收端形成等效发射多波束,获得发射自由度,实现时空二维多波束相参处理。因此,后期研究需结合电磁场幅度和相位的分布特性,深入分析波形分集阵列发射分集优势,揭示其电场分布差异的物理本质,使雷达具备更强的抗干扰、杂波抑制能力,适应未来对雷达探测性能提升的需求。

### 4.2 发射天线波形分离

FDA-MIMO雷达和EPC-MIMO雷达同时具有发射波形分集和MIMO雷达的双重优势。由于结合MIMO雷达,需要在接收端对发射波形进行分离,从而提取出距离维的可控自由度,而实际中多通道波形互相关会对雷达系统性能造成影响。同样,非理想正交波形之间的相互干扰也将会给SAR图像的质量造成不同程度的影响。特别是对于山地、沙漠以及城市等大面积散射较强的SAR场景,上述干扰将严重影响成像质量,甚至很难从所获得的SAR图像中辨别地貌特征。考虑到实际中的正交波形难以满足在任意延迟时间、任意多普勒频移条件下互相关为零的条件,加之MIMO雷达中的空间角度因素不可忽略,波形设计与优化问题是一个关键技术难题。未来可开展多维(时间维、频率维、角度维)空间中的非凸优化问题研究,同时结合波形恒模特征等系统约束,进行波形分集阵列雷达正交波形设计。

### 4.3 距离-角度-多普勒多维域联合处理

笔者认为,波形分集阵列的主要优势在于发射维自由度可控。因此,将发射维联合接收维、距离、多普勒、极化等可以提高雷达系统资源的灵活性,多维域信号处理新方法是未来雷达获取目标信息的发展方向。而目前,在对于发射维还需要深入挖掘发射自由度,包括但不局限于距离、编码自由度。研究波形分集雷达多维域中的信号分布,重点解决多维域中发射维自由度的利用与信息的提取问题,以期解决在复杂背景下的波形分集雷达系统目标检测、杂波抑制和抗干扰问题。

### 4.4 脉内欺骗式干扰抑制

对于脉内欺骗式干扰,现有波形分集技术可以实现很好的抑制效果。然而随着数字射频采集与存储转发技术的快速发展,脉内快速转发欺骗式干扰将会严重影响雷达目标探测性能。由于波形分集阵列可以在发射维形成距离可控自由度,因此,波形分集技术依然是对抗脉内快速转发干扰的有效途径。因此,需对距离维自由度的物理概念深入研究,明确发射方向图距离角度耦合的解释,进一步挖掘相干FDA可控自由度的资源。

### 4.5 多维参数联合捷变抗干扰

通过频率捷变,实现载频无规律跳转及大带宽能力,可对抗瞄准式噪声干扰、转发式假目标前拖欺骗干扰、跨脉冲重复周期欺骗式假目标和部分拖曳式干扰。通过波形捷变,使得相邻脉冲间波形正交,跨脉冲重复周期的假目标欺骗干扰无法进行时域脉冲压缩。相邻脉冲频率捷变,跨脉冲重复周期的假目标欺骗式干扰无法进行方位向积累。发射随机的极化编码序列,可以抑制固定极化发射的欺骗干扰。联合频率、极化、波形和重频捷变,不仅提高了雷达的抗侦察和低截获能力,同时对于干扰信号的抑制效果更好。

### 4.6 相控阵/波形分集阵列双模雷达体制

波形分集阵列雷达发射波束覆盖范围广,根据能量守恒,其反射信号回波的能量相比相控阵较弱,因此,该体制的弊端是回波信号的信噪比较低。如果结合相控阵的高增益特性,构建相控阵和波形分集阵列双模同时工作模式,发挥各自优势,合理利用双模信息融合的技术方向,有望提升抗干扰、杂波抑制、目标高分辨等方面的性能。

## 5 结论

发射分集技术改变了传统雷达获取信息的方式,是雷达技术创新的重要途径。波形分集阵列有别于相控阵雷达和MIMO雷达,通过合理的发射频率、时间、脉冲参数调控,依靠距离-角度二维联合发射波束形成技术,获得了额外的发射维可控自由度,采用发射-接收联合多维信号处理方法,增加了雷达系统信号处理的维度,在抗主瓣欺骗式干扰、距离模糊杂波抑制和高分宽幅成像等方面,提升了雷达系统性能。

未来随着波形分集阵列方向图调控、发射波形分多维域联合信号处理、多维参数联合捷变、相控阵-波形分集阵列双模融合检测等分项技术的日趋成熟,波形分集阵列新体制及其相关技术,将广泛应用于地海空天平台雷达的更新换代,依靠体制进步,提升雷达的多维探测能力。



## 参 考 文 献

- [1] WICKS M C. A brief history of waveform diversity[C]. 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 2009: 328–333. doi: [10.1109/RADAR.2009.4977142](https://doi.org/10.1109/RADAR.2009.4977142).
- [2] CAPRARO G T, BRADARIC I, and WICKS M C. Waveform diversity and electromagnetic compatibility[C]. 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, USA, 2007: 1–7. doi: [10.1109/ISEMC.2007.40](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2007.40).
- [3] GARNHAM J W and ROMAN J R. Why and what is waveform diversity, and how does it affect electromagnetics?[C]. 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, USA, 2007: 1–5. doi: [10.1109/ISEMC.2007.41](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2007.41).
- [4] GARNHAM J W and ROMAN J R. How will waveform diversity affect electromagnetic compatibility?[C]. 2007 International Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, 2007: 98–101. doi: [10.1109/WDDC.2007.4339388](https://doi.org/10.1109/WDDC.2007.4339388).
- [5] NEHORAI A, GINI F, GRECO M S, *et al.* Introduction to the issue on adaptive waveform design for agile sensing and communication[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(1): 2–5. doi: [10.1109/jstsp.2007.897065](https://doi.org/10.1109/jstsp.2007.897065).
- [6] PAPANDREOU-SUPPAPPOLA A, NEHORAI A, and CALDERBANK R. Waveform-agile sensing and processing [From the Guest Editors][J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1): 10–11. doi: [10.1109/msp.2008.930413](https://doi.org/10.1109/msp.2008.930413).
- [7] 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. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.01](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.01).  
LAN Lan, XU Jingwei, ZHU Shengqi, *et al.* Advances in anti-jamming using waveform diverse array radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(6): 1437–1451. doi: [10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.01](https://doi.org/10.12305/j.issn.1001-506X.2021.06.01).
- [8] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, *et al.* Multi-mission multi-mode waveform diversity[C]. 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, USA, 2006: 580–582. doi: [10.1109/RADAR.2006.1631858](https://doi.org/10.1109/RADAR.2006.1631858).
- [9] 许京伟, 朱圣棋, 廖桂生, 等. 频率分集阵列雷达技术探讨[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 167–182. doi: [10.12000/JR18023](https://doi.org/10.12000/JR18023).  
XU Jingwei, ZHU Shengqi, LIAO Guisheng, *et al.* An overview of frequency diverse array radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 167–182. doi: [10.12000/JR18023](https://doi.org/10.12000/JR18023).
- [10] WANG Wenqin. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1001–1012. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0464](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0464).
- [11] 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. doi: [10.11999/JEIT151235](https://doi.org/10.11999/JEIT151235).  
WANG Wenqin, SHAO Huaizong, and CHEN Hui. Frequency diverse array radar: Concept, principle and application[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 1000–1011. doi: [10.11999/JEIT151235](https://doi.org/10.11999/JEIT151235).
- [12] 王文钦, 陈慧, 郑植, 等. 频控阵雷达技术及其应用研究进展[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 153–166. doi: [10.12000/JR18029](https://doi.org/10.12000/JR18029).  
WANG Wenqin, CHEN Hui, ZHENG Zhi, *et al.* Advances on frequency diverse array radar and its applications[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 153–166. doi: [10.12000/JR18029](https://doi.org/10.12000/JR18029).
- [13] SEC MEN M, DEMIR S, HIZAL A, *et al.* Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle[C]. 2007 IEEE Radar Conference, Waltham, USA, 2007: 427–430. doi: [10.1109/RADAR.2007.374254](https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374254).
- [14] XU Yanhong, SHI Xiaowei, XU Jingwei, *et al.* Beampattern analysis of planar frequency diverse array[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2015, 25(5): 436–444. doi: [10.1002/mmce.20881](https://doi.org/10.1002/mmce.20881).
- [15] WANG Wenqin and SO H C. Transmit subaperturing for range and angle estimation in frequency diverse array radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(8): 2000–2011. doi: [10.1109/TSP.2014.2305638](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2305638).
- [16] KHAN W, QURESHI I M, and SAEED S. Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 14: 499–502. doi: [10.1109/LAWP.2014.2368977](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2368977).
- [17] SHAO Huaizong, DAI Jun, XIONG Jie, *et al.* Dot-shaped range-angle beampattern synthesis for frequency diverse array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1703–1706. doi: [10.1109/LAWP.2016.2527818](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2527818).
- [18] LIU Yimin, RUAN Hang, WANG Lei, *et al.* The random frequency diverse array: A new antenna structure for uncoupled direction-range indication in active sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 295–308. doi: [10.1109/JSTSP.2016.2627183](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2627183).
- [19] BASIT A, QURESHI I M, KHAN W, *et al.* Beam pattern synthesis for an FDA radar with hamming window-based nonuniform frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2283–2286. doi: [10.1109/LAWP.2017.2714761](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2714761).
- [20] XIONG Jie, WANG Wenqin, SHAO Huaizong, *et al.* Frequency diverse array transmit beampattern optimization with genetic algorithm[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 469–472. doi: [10.1109/](https://doi.org/10.1109/)

- LAWP.2016.2584078.
- [21] LAN Lan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Range-angle pencil-beamforming for non-uniformly distributed array radar[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, 29(3): 867–886. doi: [10.1007/s11045-017-0477-9](https://doi.org/10.1007/s11045-017-0477-9).
- [22] WANG Wenqin, DAI Miaomiao, and ZHENG Zhi. FDA Radar ambiguity function characteristics analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1368–1380. doi: [10.1109/TAES.2017.2785598](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2785598).
- [23] XU Yanhong, SHI Xiaowei, XU Jingwei, *et al.* Range-angle-dependent beamforming of pulsed frequency diverse array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3262–3267. doi: [10.1109/TAP.2015.2423698](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2423698).
- [24] SHAO Huaizong, LI Xiong, WANG Wenqin, *et al.* Time-invariant transmit beampattern synthesis via weight design for FDA radar[C]. 2016 IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2016: 1–4. doi: [10.1109/RADAR.2016.7485212](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.7485212).
- [25] WANG Yuxi, LI Wei, HUANG Guoce, *et al.* Time-invariant range-angle-dependent beampattern synthesis for FDA radar targets tracking[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2375–2379. doi: [10.1109/LAWP.2017.2718580](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2718580).
- [26] CHEN Baoxin, CHEN Xiaolong, HUANG Yong, *et al.* Transmit beampattern synthesis for the FDA radar[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 98–101. doi: [10.1109/LAWP.2017.2776957](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2776957).
- [27] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, *et al.* Joint range and angle estimation using MIMO radar with frequency diverse array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(13): 3396–3410. doi: [10.1109/TSP.2015.2422680](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2422680).
- [28] XIONG Jie, WANG Wenqin, and GAO Kuandong. FDA-MIMO radar range-angle estimation: CRLB, MSE, and resolution analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 284–294. doi: [10.1109/TAES.2017.2756498](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2756498).
- [29] 卢刚. 雷达有源假目标抑制方法研究[D]. [博士论文], 电子科技大学, 2008.  
LU Gang. Study of algorithms on suppression of radar active false targets[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [30] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, *et al.* Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9–17. doi: [10.1016/j.sigpro.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014).
- [31] LAN Lan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Suppression approach to main-beam deceptive jamming in FDA-MIMO radar using nonhomogeneous sample detection[J]. *IEEE Access*, 2018, 6(1): 34582–34597. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2850816](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2850816).
- [32] LAN Lan, LIAO Guisheng, and XU Jingwei. A method to suppress the main-beam deceptive jamming in FDA-MIMO radar with random polyphase codes[C]. The 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, Sheffield, UK, 2018: 509–513. doi: [10.1109/SAM.2018.8448892](https://doi.org/10.1109/SAM.2018.8448892).
- [33] 谭清莉, 张艺乐, 张伟, 等. FDA-MIMO雷达主瓣欺骗干扰对抗方法[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(6): 671–676. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.017).  
TAN Qingli, ZHANG Yile, ZHANG Wei, *et al.* A method of mainlobe deception jamming countermeasure in FDA-MIMO radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(6): 671–676. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.06.017).
- [34] 张昭建, 谢军伟, 李欣, 等. 基于FDA-MIMO的距离欺骗干扰鉴别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(4): 738–746. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0257](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0257).  
ZHANG Zhaojian, XIE Junwei, LI Xin, *et al.* Discrimination method of range deception jamming based on FDA-MIMO[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(4): 738–746. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0257](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0257).
- [35] 张劲东, 李彧晟, 朱晓华. 基于波形分集的雷达抗欺骗干扰[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(2): 138–142. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2010.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2010.02.002).  
ZHANG Jindong, LI Yusheng, and ZHU Xiaohua. Approach of radar against deception jamming based on waveform diversity[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2010, 25(2): 138–142. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2010.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2010.02.002).
- [36] LI Zhihui, ZHANG Yongshun, GE Qichao, *et al.* A robust deceptive jamming suppression method based on covariance matrix reconstruction with frequency diverse array MIMO radar[C]. 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Xiamen, China, 2017: 1–5. doi: [10.1109/ICSPCC.2017.8242590](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2017.8242590).
- [37] WANG Yuzhuo and ZHU Shengqi. Range Ambiguous clutter suppression for FDA-MIMO forward looking airborne radar based on main lobe correction[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(3): 2032–2046. doi: [10.1109/TVT.2021.3057436](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3057436).
- [38] WANG Yuzhuo and ZHU Shengqi. Main-beam range deceptive jamming suppression with simulated annealing FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9056–9070. doi: [10.1109/JSEN.2020.2982194](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2982194).
- [39] XU Jingwei, ZHU Shengqi, and LIAO Guisheng. Range ambiguous clutter suppression for airborne FDA-STAP radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal*

- Processing*, 2015, 9(8): 1620–1631. doi: [10.1109/JSTSP.2015.2465353](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2465353).
- [40] XU Jingwei, LIAO Guisheng, and SO H C. Space-time adaptive processing with vertical frequency diverse array for range-ambiguous clutter suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5352–5364. doi: [10.1109/TGRS.2016.2561308](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2561308).
- [41] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHANG Yuhong, *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. doi: [10.1109/JSTSP.2016.2615269](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2615269).
- [42] WEN Cai, PENG Jinye, ZHOU Yan, *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, 8(10): 4154–4166. doi: [10.1109/JSEN.2018.2820905](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2820905).
- [43] WANG Wenqin, SO H C, and SHAO Huaizong. Nonuniform frequency diverse array for range-angle imaging of targets[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2469–2476. doi: [10.1109/JSEN.2014.2304720](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2304720).
- [44] 王成浩, 廖桂生, 许京伟. FDA-SAR 高分辨宽测绘带成像距离解模糊方法[J]. *电子学报*, 2017, 45(9): 2085–2091. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005).  
WANG Chenghao, LIAO Guisheng, and XU Jingwei. Range ambiguity resolving method for high-resolution and wide-swath imaging with FDA-SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(9): 2085–2091. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.005).
- [45] XU Luzhou, LI Jian, and STOICA P. Radar imaging via adaptive MIMO techniques[C]. The 14th European Signal Processing Conference, Florence, Italy, 2006.
- [46] LI Jian and STOICA P. MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106–114. doi: [10.1109/MSP.2007.904812](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.904812).
- [47] TABRIKIAN J. Bounds for target localization by MIMO radars[C]. The Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, 2006, Waltham, USA, 2006: 278–281. doi: [10.1109/SAM.2006.1706137](https://doi.org/10.1109/SAM.2006.1706137).
- [48] HUA Guang and ABEYSEKERA S S. MIMO radar transmit beampattern design with ripple and transition band control[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(11): 2963–2974. doi: [10.1109/TSP.2013.2252173](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2252173).
- [49] BABUR G, AUBRY P, and CHEVALIER F L. Space-time radar waveforms: Circulating codes[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2013, 2013: 809691. doi: [10.1155/2013/809691](https://doi.org/10.1155/2013/809691).
- [50] CHEVALIER F L. Space-time transmission and coding for airborne radars[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(6): 411–421.
- [51] MELVIN W L and SCHEER J A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques[M]. Edison: SciTech, 2013.
- [52] BABUR G, AUBRY P, and CHEVALIER F L. Space-time codes for active antenna systems: Comparative performance analysis[C]. The IET International Radar Conference 2013, Xi'an, China, 2013: 1–6. doi: [10.1049/cp.2013.0240](https://doi.org/10.1049/cp.2013.0240).
- [53] FAUCON T, PINAUD G, and CHEVALIER F L. Mismatched filtering for circulating space-time codes[C]. The IET International Radar Conference 2015, Hangzhou, China, 2015. doi: [10.1049/cp.2015.1185](https://doi.org/10.1049/cp.2015.1185).
- [54] BABUR G, AUBRY P, and CHEVALIER F L. Simple transmit diversity technique for phased array radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1046–1056. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0311](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0311).
- [55] ROUSSEL K, BABUR G, and CHEVALIER F L. Optimization of low sidelobes radar waveforms: Circulating codes[C]. 2014 International Radar Conference, Lille, France, 2014: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2014.7060290](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060290).
- [56] BABUR G, AUBRY P J, and CHEVALIER F L. Antenna coupling effects for space-time radar waveforms: Analysis and calibration[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(5): 2572–2586. doi: [10.1109/TAP.2014.2309111](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2309111).
- [57] BABUR G, MANOKHIN G O, GELTSER A A, *et al.* Low-cost digital beamforming on receive in phased array radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1355–1364. doi: [10.1109/TAES.2017.2671078](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2671078).
- [58] BABUR G, MANOKHIN G O, MONASTYREV E A, *et al.* Simple calibration technique for phased array radar systems[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2017, 55: 109–119. doi: [10.2528/PIERM16101203](https://doi.org/10.2528/PIERM16101203).
- [59] LI Shengyuan, LIU Nan, ZHANG Linrang, *et al.* Transmit beampattern synthesis for MIMO radar using extended circulating code[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(6): 610–616. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0386](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0386).
- [60] WANG Huake, LIAO Guisheng, ZHANG Yuhong, *et al.* Transmit beampattern synthesis for chirp space-time coding array by time delay design[J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 110: 102901. doi: [10.1016/j.dsp.2020.102901](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102901).
- [61] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Direction-of-Arrival estimation for circulating space-time coding arrays: From beamspace MUSIC to spatial smoothing in the transform domain[J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3689. doi: [10.3390/s18113689](https://doi.org/10.3390/s18113689).
- [62] LI Shengyuan, ZHANG Linrang, LIU Nan, *et al.* Transmit diversity technique based on joint slow-time coding with circulating code[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(8): 1243–1250. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0595](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0595).
- [63] 王华柯, 廖桂生, 许京伟, 等. 空时编码阵波束域超分辨率角度估



- 计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1433–1440. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.01).
- WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Beam-space MUSIC spectral estimation method based on the Space-time coding array[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(7): 1433–1440. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2019.07.01).
- [64] NUNN C J and COXSON G E. Best-known autocorrelation peak sidelobe levels for binary codes of length 71 to 105[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 392–395. doi: [10.1109/TAES.2008.4517015](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517015).
- [65] NUNN C J and COXSON G E. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 775–781. doi: [10.1109/TAES.2009.5089560](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089560).
- [66] BORDONI F, YOUNIS M, and KRIEGER G. Ambiguity suppression by azimuth phase coding in multichannel SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(2): 617–629. doi: [10.1109/TGRS.2011.2161672](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161672).
- [67] WANG Hanbing, ZHANG Yuhong, XU Jingwei, *et al.* Range ambiguity suppression in a synthetic aperture radar using pulse phase coding and two-pulse cancellation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(20): 6525–6539. doi: [10.1080/01431161.2018.1460509](https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1460509).
- [68] DALL J and KUSK A. Azimuth phase coding for range ambiguity suppression in SAR[C]. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, USA, 2004: 1734–1737. doi: [10.1109/IGARSS.2004.1370667](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370667).
- [69] KRIEGER G, GEBERT N, and MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31–46. doi: [10.1109/TGRS.2007.905974](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905974).
- [70] LOMBARDO P, PASTINA D, and TURIN F. Ground moving target detection based on MIMO SAR systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 5081–5095. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2461594](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2461594).
- [71] KIM J H, YOUNIS M, MOREIRA A, *et al.* Spaceborne MIMO synthetic aperture radar for multimodal operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2453–2466. doi: [10.1109/TGRS.2014.2360148](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2360148).
- [72] DENG Hai and HIMED B. Interference mitigation processing for spectrum-sharing between radar and wireless communications systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 1911–1919. doi: [10.1109/TAES.2013.6558027](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6558027).
- [73] 弗朗索瓦·勒舍瓦利耶. 机载雷达的空时发射与编码[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(6): 411–421. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2008.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2008.06.003).
- CHEVALIER F L. Space-time transmission and coding for airborne radars[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(6): 411–421. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2008.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2008.06.003).
- [74] JAJAMOVICH G H, LOPS M, and WANG Xiaodong. Space-time coding for MIMO radar detection and ranging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(12): 6195–6206. doi: [10.1109/TSP.2010.2072923](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2072923).
- [75] WANG Huake, QUAN Yinghui, LIAO Guisheng, *et al.* Space-time coding technique for coherent frequency diverse array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 5994–6008. doi: [10.1109/TSP.2021.3114998](https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3114998).
- [76] CALVARY P and JANER D. Spatio-temporal coding for radar array processing[C]. The 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Seattle, USA, 1998: 2509–2512. doi: [10.1109/ICASSP.1998.681661](https://doi.org/10.1109/ICASSP.1998.681661).
- [77] SONG Xiufeng, ZHOU Shengli, and WILLETT P. Reducing the waveform cross correlation of MIMO radar with space-time coding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(8): 4213–4224. doi: [10.1109/TSP.2010.2048207](https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2048207).
- [78] XU Jingwei, ZHANG Yuhong, LIAO Guisheng, *et al.* Resolving range ambiguity via multiple-input multiple-output radar with element-pulse coding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 2770–2783. doi: [10.1109/TSP.2020.2988371](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2988371).
- [79] XU Jingwei and SO H C. Study on coding scheme with EPC-MIMO radar in clutter-free scenario[C]. 2020 IEEE 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), Hangzhou, China, 2020. doi: [10.1109/SAM48682.2020.9104270](https://doi.org/10.1109/SAM48682.2020.9104270).
- [80] LAN Lan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Mainlobe deceptive jammer suppression using element-pulse coding with MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2021, 182: 107955. doi: [10.1016/j.sigpro.2020.107955](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107955).
- [81] WANG Hanbing, ZHANG Yuhong, XU Jingwei, *et al.* Study on coding scheme for space-pulse-phase-coding-based high-resolution and wide-swath SAR imaging[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(18): 7202–7216. doi: [10.1080/01431161.2020.1754498](https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1754498).
- [82] WANG Hanbing, ZHANG Yuhong, XU Jingwei, *et al.* A novel range ambiguity resolving approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging utilizing space-pulse phase coding[J]. *Signal Processing*, 2020, 168: 107323. doi: [10.1016/j.sigpro.2019.107323](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107323).
- [83] 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. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.08.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.08.08).

XU Jingwei, LAN Lan, ZHU Shengqi, *et al.* Design of matched filter for coherent FDA radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(8): 1720–1728. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.08.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.08.08).

- [84] LAN Lan, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Transceive beamforming with accurate nulling in FDA-MIMO radar for imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*

*Sensing*, 2020, 58(6): 4145–4159. doi: [10.1109/TGRS.2019.2961324](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961324).

- [85] WANG Chenghao, XU Jingwei, LIAO Guisheng, *et al.* A range ambiguity resolution approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging using frequency diverse array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 336–346. doi: [10.1109/JSTSP.2016.2605064](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2605064).

### 作者简介



朱圣棋(1984–), 男, 江西赣州人, 博士, 教授。2010年在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室获得博士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授。主要研究方向为雷达运动目标检测、频率分集阵列、波形分集阵列雷达信号处理。



兰 岚(1993–), 女, 陕西西安人, 博士, 准聘副教授。2020年在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室获得博士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室准聘副教授。主要研究方向为波形分集阵列、雷达抗干扰方法、MIMO雷达技术。



余 昆(1995–), 男, 江苏泰州人, 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在读博士研究生。主要研究方向为合成孔径雷达成像、波形分集阵列雷达抗干扰技术等。



李西敏(1983–), 男, 山东聊城人, 博士。现担任西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室副教授。主要研究方向为目标电磁散射建模、波形分集雷达抗干扰等。



许京伟(1987–), 男, 山东日照人, 博士, 副教授。2015年在西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室获得博士学位, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室副教授。主要研究方向为雷达系统建模、阵列信号处理、波形分集雷达(频率分集阵列和空时编码阵列)等。