

频率分集阵列雷达研究进展

王博^{1,2}, 陈楚舒², 郭亚军¹, 刘乃滔¹, 许泽华¹

1. 中国人民解放军95972部队, 酒泉 735300

2. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051

摘要 与相控阵通过阵元之间的相差控制波束指向不同, 频率分集阵列(FDA)雷达通过在阵元间引入频差的方式可以实现更高自由度的波束控制。概述了国内外频率分集阵列雷达的研究进程, 重点从阵列结构及方向图解耦技术、电子反对抗技术应用、电子对抗技术应用等方面梳理并分析了FDA当前的国内外研究现状。在此基础上, 针对基于解耦的FDA非时变波束控制、基于FDA的电子战技术以及基于FDA雷达实用化研究等后续亟待解决的关键技术难点问题展开分析。分析得出, 要实现基于FDA的实战化应用, 需要得到可行的非时变FDA距离-角度解耦波束控制方法, 并开展基于FDA结构分析、发射波形设计和频控函数设计的综合应用研究, 从而推进目前处于概念系统设计阶段的FDA雷达的实战化应用进程。

关键词 频率分集阵列; 解耦; 新体制雷达; 阵列设计

频率分集阵列(frequency diverse array, FDA)作为一种距离-角度二维相关波束形成技术, 由伦敦大学博士研究生 Antonik 等在2006年IEEE雷达国际会议上首次提出^[1]。由于FDA独特的阵列特性为传统电扫描体制性能局限的突破提供了新的思路, FDA的概念一经提出就得到了国内外雷达学者的广泛关注。雷达体制的发展至今主要经历了2个阶段: 第1个阶段是机械扫描体制。机械扫描体制以不断转动的馈源或天线阵面为主要特征, 通过雷达组件机械转动的方式实现雷达波束空间指向的改变。机械扫描雷达在不列颠空战中发挥了

重要作用, 但随后迅猛发展的超音速飞行器给机械扫描雷达带来了新的挑战。因此, 在第2个阶段中出现了代替机械扫描模式的电扫描波束控制方式。以相控阵(phased array, PA)为例, 电扫描方式无需阵面做机械转动, 代以空间波束合成的方式实现波束的高效控制。现今, 相控阵技术已得到广泛应用, 但无论相控阵还是频扫阵所形成的波束都无法分辨同一方向不同距离的2个目标, 在抑制距离相关性干扰等问题中存在局限。与相控阵波束指向只具有角度相关性不同, 频率分集阵列通过在阵元间引入固定频差, 在无需移相器的情况下可形成距

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(62001506)

作者简介: 王博, 博士, 研究方向为频率分集阵列雷达干扰抑制方法, 电子信箱: wb_wangbo1991@163.com

引用格式: 王博, 陈楚舒, 郭亚军, 等. 频率分集阵列雷达研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(9): 66-77; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.

离-角度相关的时变波束指向^[1]。目前国内关于FDA技术的研究发展迅速,需要对近年来FDA关键技术的发展现状和亟待解决的关键技术难点做出梳理。本研究旨在系统梳理FDA雷达的发展历程及当前重点技术的现状,从而为后续FDA领域内从当前阵列特性理论研究为主向结合实装测试研究的转变奠定基础。

1 FDA模型

图1所示为基本FDA的阵列结构^[1]。

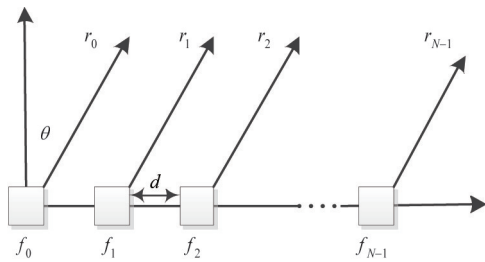


图1 基本FDA的阵列结构

设载波频率为 f_0 ,阵元 n 的辐射信号频率为 $f_n = f_0 + \Delta f_n = f_0 + n\Delta f$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ (1)

窄带条件下,阵元 n 的发射信号表示为 $s_n(t) = \exp(j2\pi f_n t)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ (2)

阵元 n 发射的信号到达远场观测点 (R, θ) 的信号表达式为

$$s_n(t) = \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{r_n}{c}\right)\right] \quad (3)$$

式中, $r_n = R - nd\sin\theta$; R 为参考阵元到目标点的距离; d 为阵元间距; c 表示光速。远场观测点 (R, θ) 处的电场强度的总和为

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{R}{c} + \frac{nd\sin\theta}{c}\right)\right] \quad (4)$$

取 $\gamma = \Delta f t + (f_0 d \sin\theta)/c - \Delta f R/c$,由于 $f_0 \gg N\Delta f$,

式(4)可化简为

$$E = \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi n\gamma) =$$

$$\frac{\sin(N\pi\gamma)}{\sin(\pi\gamma)} \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \exp[j(N-1)\pi\gamma] \quad (5)$$

取阵列因子 $AF(t, R, \theta)$ 为

$$AF_1(t, R, \theta) = \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]} \quad (6)$$

取相位方向图为

$$\Phi_1 = \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \times \exp\left[j(N-1)\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right] \quad (7)$$

由式(6)可得FDA的时间、距离角度周期性计算公式^[2]

$$t = \frac{R}{c} + \frac{1}{\Delta f} \left(m - \frac{d \sin\theta}{\lambda}\right), \quad m = 1, 2, \dots \quad (8)$$

$$R = ct - \frac{1}{\Delta f} \left(mc - \frac{dc \sin\theta}{\lambda}\right), \quad m = 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$\sin\theta = \left(\frac{\lambda}{d}\right)m + \frac{\Delta f}{f_0 d} (R - ct), \quad m = 1, 2, \dots \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可知,当距离 R 和角度 θ 固定时,方向图时间维的最小周期为 $1/\Delta f$;当时间 t 和角度 θ 固定时,方向图距离维的最小周期为 $c/\Delta f$ 。由式(6)得归一化的方向性函数

$$F(t, R, \theta) = \frac{\left| \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{N \sin\left[\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]} \right|}{\left| \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)} \right|} \approx \quad (11)$$

图2、图3分别为二维平面内相控阵与FDA的发射方向图,仿真参数见表1。如图2所示,相控阵的波束指向为阵列法线方向。以距离为坐标,FDA

的发射方向图为如图 3(a)所示的“环形”；以角度和距离为坐标，FDA的发射方向图为如图 3(b)所示的“S形”。图 4所示为相控阵与FDA在固定角度位置处其波束指向随距离的变化。由图 4可知，相

控阵的波束指向仅与角度相关而与距离无关，而FDA的波束指向具有距离-角度二维相关性。在同一角度不同距离上FDA的波束指向存在较大偏移，存在对侦查方实施定位欺骗的可能。

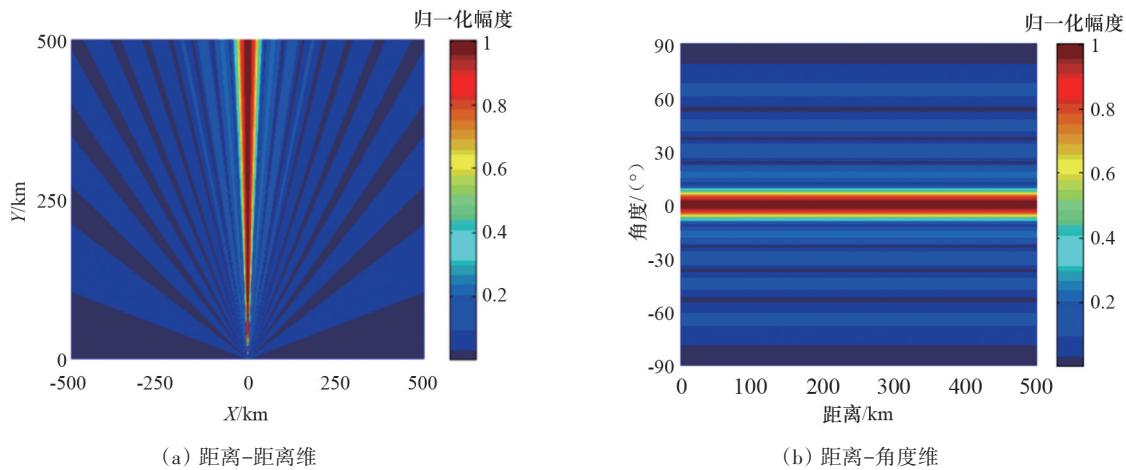


图2 相控阵发射方向

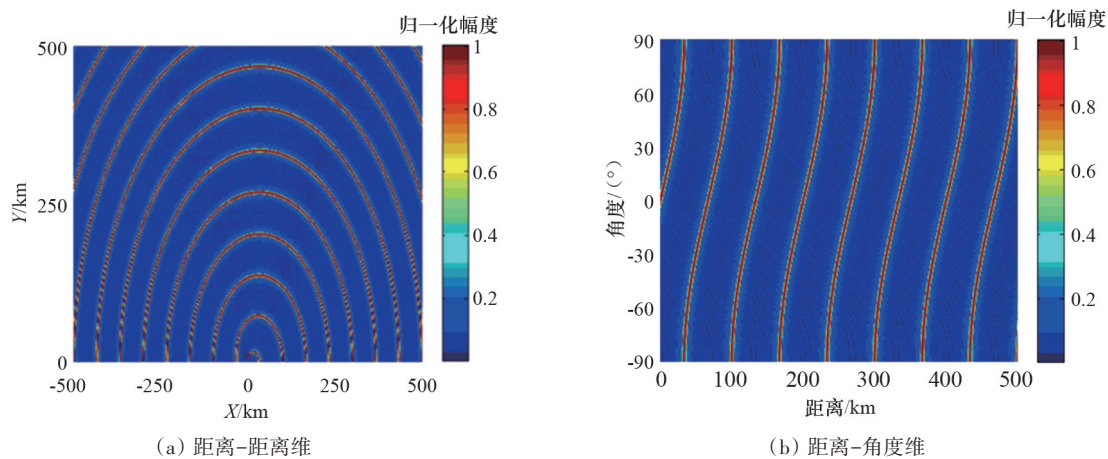


图3 FDA发射方向

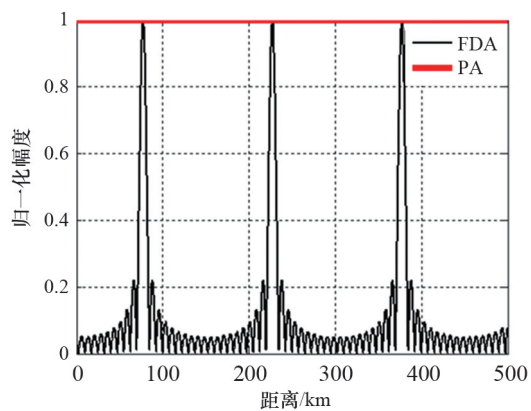


图4 固定位置处PA与FDA的距离维波束指向

表1 FDA雷达仿真参数

参数	取值	参数	取值
阵元数 N	20	阵元间距 d/m	0.15
频偏增量 Δ/kHz	4.5	基准载频 f_0/GHz	1

2 FDA 雷达研究现状分析

与相控阵通过移相器在阵元之间引入固定相位差的电扫描方式不同^[3]，通过在阵元之间引入一个相比载频而言大小可忽略的固定频偏，FDA可以实现具有更高自由度的时间-距离-角度三维相关波束

指向^[4]。目前,国内外关于FDA有广泛的研究。其中,国外的研究起步较早,主要成果集中在欧美等国家和地区^[5]。国内从2012年开始逐渐有越来越多的团队开展研究,主要包括电子科技大学、西安电子科技大学、清华大学、国防科技大学、空军工程大学、海军工程大学、雷达预警学院、南京理工大学以及中国电子科技集团公司第十四研究所等科研机构。结合本文的研究内容,以下从4个方面介绍FDA的国内外研究现状。

2.1 阵列结构及方向图距离-角度解耦技术

P. Antonik在2006年提出了FDA概念,在2008—2009年取得多项美国专利^[6-7]。2009年,在美国空军实验室的资助下,P. Antonik提交了自己关于FDA阵列特性分析的博士论文,从其论文可知在2009年,P. Antonik已经成功搭建了FDA的发射和接收单元模型^[8]。2006年之后的一段时间内,国内外研究基本都是集中在关于FDA结构^[9]、波束方向图基本特性分析以及FDA发射接收机结构设计^[10]等方面,当时较少有关于FDA与其他体制结合、FDA体制在实际问题中应用的研究。之后,随着关于FDA结构及方向图特性分析的逐渐深入,陆续有文献指出频率分集阵列发射波束会出现距离和方位角响应的耦合,因而无法利用其无模糊地实现目标距离和方位的二维联合估计问题。因而在较长的一段时间内,如何实现FDA方向图距离-角度耦合的消除、波束能量的空间精确控制成为研究热点。

如何改进频率分集阵列“S形”波束图性能的问题,主要有2种思路:一种着眼于频控函数设计,另一种主要着眼于阵列结构设计。在非线性的频控函数设计方面,Khan等^[11]得到log-FDA雷达只依赖距离的发射波束形成方法,实现了干扰抑制、输出信干噪比改善以及雷达探测性能的增强。Gao等^[12]通过在均匀线阵阵元间采用平方及立方2种频偏增加方式消除了方向图中的距离-角度耦合。Wang等^[13]设计了一种基于伪随机频控函数的非线性多载频调制系统,可在减小主瓣波束宽度的同时有效地抑制旁瓣峰值。Basit等^[14]及Liao等^[15]针对FDA“S形”波束图在多个距离、角度对产生极值点,因而导致了输出信干噪比降低且易于被干扰的问

题,分别通过引入基于汉明(Hanning)窗加权的频偏增量、基于参数可变的泰勒窗加权频偏FDA,实现了波束图在远场目标点处的单极值。Shao等^[16]以最大化输出信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)为准则设计了一种自适应频偏选择方案。项喆等^[17]在干扰背景下基于斜投影算子计算最优频偏增量,Xiong等^[18]通过遗传算法解算出最优频偏增量取值,Wang等^[19]使用Costas序列调制的频偏增量来消除波束图中固有的距离-角度耦合。Wang等^[20]通过在FDA中采用离散球体序列频偏增量将发射能量集中在期望的目标位置。

阵列结构设计通过将均匀线性FDA划分为多个使用相同或不同频控函数的子阵实现波束图的叠加,实现在增强目标点增益的同时消除其他极值点。Wang等^[21]将FDA划分为采用不同频控函数且左右相邻的等阵元数子阵,之后,远场目标点的距离和角度数值可直接从发射-接收波束图的峰值得出。Xu等^[22]提出具有不同频偏增量的多个非重叠子阵列FDA结构,并且这些具有非零频移的子阵列成对存在,从而同时获得了距离域和角度域的自由度。虽然通过子阵结构实现了波束图的距离-角度解耦,但通过上述结构设计获得的雷达目标定位性能仍需进一步发展。Sammartino等^[23]提出了一种双基地FDA雷达结构,通过阵元的非线性布阵方式获得了波束图的距离-角度解耦。Wang等^[24]提出分别发射零频偏增量和非零频偏增量2种不同脉冲的FDA雷达结构,可直接从波束成形输出峰值中估算目标的方位角和视距距离。Wang等^[25]通过提出的非线性FDA发射阵列和均匀相控阵接收阵列组成的雷达系统实现了目标定位。

上述2种思路单独得到的距离-角度解耦的FDA波束图中峰值仍然是周期性的,多重模糊估计结果不可避免地会严重限制雷达目标定位的性能。为了克服这一限制,Xu等^[26]通过多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)体制和FDA的结合实现了目标的无模糊定位。Turhaner等^[27]提出了一种可有效降低Qin等^[28]所提方法中计算量的单脉冲方法,但这种方法不能实现距离和角度的联合估计。Wang等^[29]以子阵FDA为发射阵列,全

波段 FDA 为接收阵列组成的定位系统在发射、接收波束图中都实现了距离-角度解耦,同时可实现低计算量、高精度的目标距离和角度信息的联合估计。在单独地从频控函数设计或者阵列结构设计角度都不能有效地实现方向图距离-角度解耦的情况下,Khan 等^[30]将 2 种思路结合起来,通过在每一个多输入多输出频率分集阵列(multiple-input multiple-output based on frequency diverse array, FDA-MIMO)的子阵中使用一个变化的对数频偏,消除了 FDA 波束图固有的周期性,形成 MIMO-log-FDA,在目标可能存在的空间中形成单极值。Wang 等^[31]提出了一种阵元发射多载频的交叉子阵 sin-FDA 结构,可有效地实现波束的精确控制,且此方法同时适用于二维面阵 FDA。

2.2 电子反对抗技术应用

电子反对抗(electronic counter-countermeasure, ECCM)的主要目的是抑制干扰信号并保证我方有效地使用电磁信息^[32]。FDA 雷达可以通过改变载波频率和频率增量以离散方式扫描空间中的每个点,因此提供了极大的 ECCM 应用潜力^[33]。相控阵与距离无关的波束指向特性使其不能有效抑制与目标位于同一角度不同距离的主瓣干扰^[34]。针对这一问题,有文献提出使用分布式多接收机加以解决,但这一方法存在时钟同步和接收机数目的限制因素^[35]。现有文献中较少有基于自适应波束形成算法的 FDA 主瓣干扰抑制技术研究,但 FDA 雷达波束的距离-角度相关特性在主瓣干扰和支援式干扰抑制中都有着巨大的潜在价值。

针对主瓣欺骗干扰降低目标的估计精度和跟踪精度,带来巨大的资源消耗和严峻威胁的问题。Lan 等^[36]首先根据伪目标产生过程中的时延差,在联合收发空频域中区分出真假目标,之后提出了一种基于 FDA-MIMO 发射非正交波形的主瓣距离欺骗干扰抑制方法。Xu 等^[37]利用 FDA-MIMO 结构发射-接收空间角频率的相对关系进行主瓣欺骗干扰鉴别。在接收端通过自适应波束成形技术形成距离-角度相关的阵列波束图,对距离-角度二维平面中的假目标位置置零,距离域中的附加自由度^[38]使得常规雷达中无法区分的主瓣假目标与真

实目标在距离维可分。但这需要足够数量的假目标本来估计欺骗干扰的协方差矩阵。Li 等^[39]在 FDA-MIMO 结构的基础上,将欺骗性干扰抑制问题转化为探测真实目标的同时抑制潜在欺骗性干扰的问题,提出的双脉冲探测体制可以保证较高的假目标抑制率。Xu 等^[40]建立了以 FDA 为发射阵列的 MIMO 雷达空时自适应处理结构,可将目标与杂波和干扰在距离-角度-多普勒域中进行区分,以抑制虚假目标。

针对抑制与目标位置接近的支援式干扰,Wang 等^[41]在交叉子阵 sin-FDA 结构的基础上,通过稳健波束形成优化算法修正低快拍下的协方差矩阵,消除导向矢量适配时出现的主瓣畸变,实现了对阵列方向图主瓣的有效纠偏和保形。针对目标导向矢量失配时欺骗干扰抑制性能降低的问题, Li 等^[42]结合可能的目标区域先验知识,提出了一种基于 FDA-MIMO 雷达协方差矩阵重构的鲁棒性欺骗干扰抑制方法,显著提高了欺骗干扰抑制性能。Xu 等^[43]建立了以 FDA 为发射阵列的空时自适应处理(space-time adaptive processing, FDA-STAP)雷达新框架,在 FDA-STAP 中距离模糊的杂波在空间频域中可以被有效抑制。Wu 等^[44]提出了一种基于 FDA 抑制高超音速飞行器前视雷达杂波的新方法。

2.3 电子对抗技术应用

干扰机在对目标雷达施放干扰的过程中,其辐射信号也会被敌方的无源探测雷达所捕获,这将对干扰机的安全构成严重威胁^[45]。基于 FDA 干扰机的辐射信号经目标雷达接收后,由于 FDA 方向图的时间-距离-角度相关特性,可以在敌方雷达对干扰机定位过程中实现干扰,保护干扰机的安全,有效遂行掩护任务。在电子对抗(electronic countermeasures, ECM)中,干扰机需要生成精确的干扰信号,以便误导敌方雷达^[46]。文献[47]对 FDA 的研究现状进行了系统总结,分析了 FDA 在射频隐身雷达中的应用前景^[47]。而基于 FDA 形成虚拟辐射源从而实现对方探测雷达的探测干扰,无疑是实现射频隐身的重要方法。胡祺勇等^[48]从原理上分析了 FDA 对振幅法测向实现干扰的可能性。葛佳昂等^[49]仿真验证了 FDA 各阵元间存在的相位差对

处于远场的干涉仪具有角度欺骗效果。在此基础上,王博等^[50-51]分析了FDA对测向交叉定位系统和相邻天线比幅单脉冲测向系统定位的精度影响。敌方无法确定FDA干扰机的位置,大大提高了干扰机的生存能力。随着电子对抗技术的发展,迫切要求发展干扰机在随队攻击过程中对敌方有源干扰源的对抗技术。针对这一问题,Ge等^[52]建立了固定时刻的频偏增量调节优化模型,采用改进的群免疫优化算法求解,实现了一种基于FDA雷达相位中心的认知有源抗干扰方法。

FDA各阵元间存在的频差使其在雷达干扰领域具有独特的特性和优势。Zhu等^[53]在2018年的IGARSS会议论文中首次提到关于FDA干扰的研究。在对典型压制干扰、欺骗干扰样式仿真分析的基础上,明靖鸥^[54]提出了一种基于频控阵可对脉冲多普勒雷达产生距离-速度维多假目标的干扰方法。汪辉^[55]介绍了电子科技大学科研团队研制的FDA干扰设备,信号源的实施方案及其实现系统框图填补了国内关于FDA实施干扰试验的空白。Huang等^[56]提出了一种利用FDA雷达对星载合成孔径雷达进行散射波欺骗干扰的方法,可以在距离维产生多假目标欺骗,且假目标在角度维的分布可通过改变频偏增量的方式移动。Wang等^[57]提出了一种利用FDA天线对高分辨率侧视合成孔径雷达成像进行多场景欺骗干扰的方法。Huang等^[58]仿真验证了FDA对双基地SAR具有良好的欺骗干扰效果。Zong等^[59]提出了一种基于FDA的微动干扰方法。

2.4 其他方面

首先是FDA雷达的目标参数估计研究。FDA雷达的目标参数估计性能的优化是建立在FDA雷达波束控制的基础上的,Khan等^[60]提出了FDA-MIMO雷达结构以改善雷达的距离-角度定位性能。Sen^[61]提出了一种峰均功率比约束的帕累托最优波形设计方法,用于使用空时自适应处理技术的正交频分复用雷达信号目标探测。

其次是FDA与其他体制结合的研究。从上文中也可看出,较早开始并得到较为广泛研究的是FDA与MIMO体制的结合^[62]。与相控阵-MIMO雷达只有角度相关性的波束不同,Wang^[63]将FDA结

构与MIMO雷达相结合,得到了距离相关的波束指向。Xu等^[64]提出的垂直频率分集阵列,在垂直方向上引入步进频率以规避STAP雷达中的距离模糊问题。

再者是面阵、环阵等阵元布阵形式的FDA结构研究。Yao等^[65]设计出一种可以有效实现远场无线能量传输的二维FDA面阵(wireless power transmission based on FDA, WPT-FDA)结构。Saeed等^[66]首次对均匀对称环形FDA的结构特性展开分析,得到了相比平面FDA(planar frequency diverse array, PFDA)更优的峰值旁瓣比。

再者是FDA在其他具体应用中的研究。Cetintepe等^[67]最早提出了一个FDA多径特性分析的理论框架。Baizert等^[68]分析了FDA在前视雷达地面运动目标指示中的应用。Farooq等^[69]研究了FDA在合成孔径雷达成像中的应用。Wang^[70]提出了一种用于高分辨率成像的空时编码MIMO正交频分复用SAR结构方案。Hu等^[71]通过随机分配FDA发射天线的载频设计出基于随机FDA的人工噪声定向调制(random frequency diverse array-based directional modulation with artificial noise, RFDA-DM-AN)方案^[72]。Wang^[73]提出的认知FDA雷达通过根据环境自适应地改变频率增量的闭环控制算法,获得了更好的阵列性能。基于认知FDA雷达,Saeed等^[74]提出了一种自适应的方向图调零技术。Huang等^[75]提出了将频率分集阵列和正交频分复用波形用于集成导航、探测和通信的方法。

3 亟待解决的关键技术难点

3.1 基于解耦的非时变波束控制研究

上文梳理了FDA阵列结构及方向图距离-角度解耦技术的研究现状,而现有关于FDA波束图距离-角度解耦的研究中,大多没有考虑FDA波束图的时变特性以及电磁波在空间传播过程中的时延问题。因此,得到的是未考虑信号发射接收实际过程的静态波束图。对基本的一维均匀线性FDA雷达,在脉冲周期内,其波束空间扫描的过程中只在极短的时间内照射目标,这就使得目标点反射回

雷达接收机的能量不足,导致雷达的目标探测性能较差。在实现了FDA静态波束图的距离-角度解耦之后,目前的研究热点聚焦在脉冲周期内波束指向的非时变控制方面。针对上述问题,Xu等^[76]通过增加一个忽略时间变量 t 的约束条件推导了一种脉冲FDA的准静态波束图。Gao等^[77]采用3种基于凸优化的算法得到了非时变的波束图。Khan等^[78]将时间 t 和目标点位置坐标 (R, θ) 引入频控函数的计算公式,得到了非时变的波束图,但未考虑FDA方向图的距离-角度耦合消除和电磁波空间传播的时延问题。Wang等^[79]将文献[78]中的频率偏移与多载波FDA相结合,得到了可用于目标跟踪的非时变点状波束图。Yao等^[80]提出了2种时间调制优化频偏方案,使得FDA雷达的辐射能量能够非时变地聚焦在单个目标位置或多个目标位置。与文献[78]相比,Yao等^[81-82]、Fang等^[83]通过采用时间调制与非线性分布的频控函数在目标位置处形成了旁瓣更低的非时变点状波束指向。但文献[76]~[83]在推导目标点接收到的雷达发射信号及FDA阵列因子的过程中,忽略了实际中阵列发射信号的传播过程导致的时间调制频控函数中与距离 r 的相关性,即应当以 $\Delta f(t - r/c)$ 代替^[84]。因此,不能假设时间变量 t 是固定值,或仅设置为从0到 T_p (T_p 是脉冲FDA的脉冲持续时间)。此时,文献[80]~[83]中的点状波束指向在1个雷达脉冲周期内会发生偏移,无法建立远场条件下的时不变空间聚焦波束图 $\Delta f(t)$ ^[85-86]。Chen等^[87]研究认为在实际限制条件下,无法获得仅聚焦于某些特定的空间位置且持续一定时间的非时变解耦波束图。综上,目前国内外在静态波束图的假设上分析FDA波束空间控制的文献虽已解决了由于FDA波束图距离、角度周期性而造成的SINR损失,但现有文献仍然没有解决因FDA波束图时变特性而导致的SINR损失问题。由于FDA波束图的周期性,国内外学者致力于寻找一种能将发射能量集中在期望位置并持续一段时间的时不变点状波束图,而这一技术是FDA雷达在后续实现预警探测、目标识别等一系列工程实际应用之前,首先需要彻底解决的问题。

3.2 基于FDA的电子战技术研究

与相控阵雷达相比,FDA雷达是一种具有巨大

潜力的电扫描体制,在未来实现FDA非时变点状波束指向控制的基础上,如何利用FDA雷达实现干扰对抗和雷达干扰施放或将成为推动FDA实用化发展的重要研究领域。王博等^[88]、Wang等^[89]推导了FDA的模糊函数,验证了线性调频、相干脉冲串以及相位编码信号这几种典型的雷达信号对全波段相干处理FDA雷达结构的适应性,没有基于此进一步深入开展FDA发射波形设计以实现干扰抑制、测向定位欺骗等的研究。第2.2节、2.3节梳理了FDA雷达在主瓣干扰抑制、随队支援干扰抑制、测向定位系统欺骗以及合成孔径雷达成像欺骗等领域的研究现状。Wang等^[41]在实现点状波束控制的基础上,通过协方差矩阵的修正和改进自适应波束形成算法的采用实现了基于交叉子阵sin-FDA结构的随队支援式干扰抑制。但仿真计算过程中,目标点的位置先验已知,缺少对实际中需要首先通过波达方向(direction of arrival, DOA)估计得到目标先验信息的考虑。Lan等^[36]采用固定权向量为指向目标的导向矢量的非自适应波束形成方法,从而代替文献[41]中利用样本数据计算协方差获取自适应权的方法。通过选择合适的频率步进量,可以有效地对抗主瓣欺骗式干扰。但文中没有关于波束图多极值问题的处理。Liu等^[38]提出了RFDA阵列结构,实现了对目标方向和距离的无耦合定位的方法。但该方法需要足够数量的假目标样本来估计欺骗干扰的协方差矩阵。在实际中,由于假目标的存在是不可预测的,因此很难找到足够的假目标辅助数据。因此,在没有干扰假目标先验知识的情况下,基于FDA-MIMO结构的假目标抑制技术仍有很多待解决的问题。综上可知,现有关于FDA在电子战领域的研究文献中,缺乏系统基于FDA结构分析、发射波形设计和频控函数设计的综合考虑。

3.3 基于FDA雷达的实用化研究

国内外关于FDA从最开始的阵列基本特性研究到后来关于FDA在目标定位、安全通信等领域的具体化应用,都是在理论层面所作的分析研究。要真正实现FDA雷达在现实装备中对相控阵雷达的全面替代,如何实现FDA雷达的工程设计是一切问题的前提。在FDA发射与接收波束形成方

面,王博等^[88]分析了几种典型雷达信号的FDA特性,Wang等^[89]分析了线阵发射、单天线接收模型下的FDA负型模糊函数,但后续没有基于此进一步深入开展FDA的发射波形设计研究。Mai等^[90]分析了具有稀疏频率波形的FDA-MIMO雷达波束图设计问题,并将其表述为非凸优化问题加以解决。上述文献中的FDA接收机结构需要大量的滤波器、移相器和幅度放大器,制造成本高昂。因此,Han等^[91]提出了一种元器件数量可大幅减少的接收机结构。Gui等^[92]提出了一种多通道匹配滤波接收器结构以有效接收脉冲FDA信号。Xu等^[93]设计了一种基于子脉冲匹配的距离角匹配FDA接收机结构。Gui等^[94]提出了一种基于FDA信号的最大似然准则,由最优估计与检测得出通用FDA接收机结构。Vakalis等^[95]提出了使用线性调频信号波形和宽基线分布式阵列接收机的角度估计技术。在FDA雷达原型机设计建造方面,P. Antonik于2009年成功搭建了FDA发射和接收单元模块^[8]。2015年,土耳其中东理工大学研制了一款基于线性调频波信号的FDA雷达原型机^[96]。但这一系统仅仅试验验证了FDA雷达波束方向图基本的时间-距离相关性。2016年,西安电子科技大学研究团队开始建设FDA雷达原型机,目前已完成了第一代波形分集试验系统,突破了多通道发射一致性校正、发射调制误差容限、发射接收联合处理等一系列关键技术。电子科技大学研究团队于2017年研制了针对FDA雷达的多通道信号源和FDA天线,并开发了能够满足FDA雷达系统仿真与数据处理的软件平台“FDA雷达仿真与处理系统”^[96]。总体而言,目前FDA雷达尚处于概念系统设计阶段,亟待开展FDA雷达原理样机研制与关键技术试验验证方面的深入研究。

4 结论

对FDA雷达在方向图距离-角度解耦以及干扰、抗干扰应用等方面的国内外研究现状做了重点分析研究,指出了FDA雷达在基于解耦的非时变波束控制、电子战技术以及雷达实用化研究方面亟

待解决的关键技术难点,包括如何获得仅聚焦于某些特定空间位置且持续一定时间的非时变解耦波束图,基于FDA结构分析、发射波形设计和频控函数设计综合考虑FDA在电子对抗、电子反对抗领域应用等方面。在后续关于FDA雷达的研究中应当更重视实物仿真平台的搭建与实验,从而推动FDA雷达研究从概念系统设计领域向实际装备中的应用发展转变。

参考文献(References)

- [1] Antonio P, Wicks M C, Griffiths H D, et al. Frequency diverse array radars[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Piscataway: NJ, 2006: 470-475.
- [2] Mustafa S, Demir S, Hizal A, et al. Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle[C]//Proceedings of 2007 IEEE Conference on Radar. Piscataway NJ: IEEE, 2007: 427-430.
- [3] Bauman B, Christianson A, Wegener A, et al. Dynamic visualization of antenna patterns and phased-array beam steering[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(3): 184-193.
- [4] Antonio P, Wicks M C, Griffiths H D, et al. Multi-mission multi-mode waveform diversity[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Radar. Piscataway NJ: IEEE, 2006: 580-582.
- [5] Wang W Q. Frequency diverse array antenna: New opportunities[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(2): 145-152.
- [6] Wicks M C, Antonio P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase: 7319427[P]. 2008-01-15.
- [7] Wicks M C, Antonio P. Method and apparatus for a frequency diverse array: 7511665[P]. 2009-03-31.
- [8] Antonio P. An investigation of a frequency diverse array [D]. London: University College London, 2009.
- [9] Sammartino P F, Baker C J, Griffiths H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2013, 49(1): 201-222.
- [10] Jones A M, Rigling B D. Frequency diverse array radar receiver architectures[C]//Proceedings of 2012 International Waveform Diversity & Design Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2012: 211-217.
- [11] Khan W, Qureshi I M, Saeed S. Frequency diverse array

- radar with logarithmically increasing frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 499–502.
- [12] Gao K D, Wang W Q, Cai J, et al. Decoupled frequency diverse array range-angle-dependent beam pattern synthesis using non-linearly increasing frequency offsets[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(8): 880–884.
- [13] Wang Z, Mu T, Song Y, et al. Beamforming of frequency diverse array radar with nonlinear frequency offset based on logistic map[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2018, 64: 55–63.
- [14] Basit A, Qureshi I, Khan W, et al. Beam pattern synthesis for an FDA radar with hamming window based non-uniform frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2283–2286.
- [15] Liao Y, Tang H, Chen X, et al. Frequency diverse array beam pattern synthesis with Taylor windowed frequency offsets[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(11): 1901–1905.
- [16] Shao H Z, Li J C, Chen H, et al. Adaptive frequency offset selection in frequency diverse array radar[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13(5): 1405–1408.
- [17] 项喆, 陈伯孝, 杨明磊. 频率分集雷达最优频率间隔选择方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2017, 44(4): 12–17.
- [18] Xiong J, Wang W Q, Shao H, et al. Frequency diverse array transmit beam pattern optimization with genetic algorithm[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017(16): 469–472.
- [19] Wang Z, Wang W Q, Shao H. Range-azimuth decouple beamforming for frequency diverse array with Costas-sequence modulated frequency offsets[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016, 2016(1): 124.
- [20] Wang W Q. Range-angle dependent transmit beam pattern synthesis for linear frequency diverse arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(8): 4073–4081.
- [21] Wang W Q. Subarray-based frequency diverse array radar for target range-angle estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2014, 50(4): 3057–1076.
- [22] Xu Y, Shi X, Xu J, et al. Range-angle-decoupled beam pattern synthesis with subarray-based frequency diverse array[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 64: 49–59.
- [23] Sammartino P F, Baker C. The frequency diverse bistatic system[C]//*Processing of 2009 International Waveform Diversity and Design Conference*. Piscataway NJ: IEEE, 2009: 155–159.
- [24] Wang W Q, Shao H. Range-angle localization of targets by a double-pulse frequency diverse array radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(1): 106–114.
- [25] Wang W Q, So H C, Shao H. Nonuniform frequency diverse array for range-angle imaging of targets[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2469–2476.
- [26] 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 Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(13): 3396–3410.
- [27] Turhaner A, Demir S, Hizal A. Monopulse direction finding for linear frequency modulation based frequency diverse array[C]//*Processing of 2017 IEEE Radar Conference*. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 89–94.
- [28] Qin S, Zhang Y D, Amin M G, et al. Frequency diverse coprime arrays with coprime frequency offsets for multi-target localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 321–335.
- [29] Wang S L, Xu Z, Liu X, et al. Subarray-based frequency diverse array for target range-angle localization with monopulse processing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(14): 5937–5947.
- [30] Khan W, Qureshi I M, Basit A, et al. Performance analysis of MIMO-frequency diverse array radar with variable logarithmic offsets[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2016, 62: 23–34.
- [31] Wang B, Xie J, Zhang J, et al. Dot-shaped beamforming analysis of subarray-based sin-FDA[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2019, 20(10): 1429–1444.
- [32] Abdalla A, Abdalla H, Ramadan M, et al. Overview of frequency diverse array in radar ECCM applications[C]//*International Conference on Communication, Control, Computing, and Electronic Engineering*. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 1–9.
- [33] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: The parametric approach[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 7(13): 67–94.
- [34] So H C. Source localization: Algorithms and analysis[M]//*Handbook of Position Location: Theory, Practice and Ad-*

- vances. Piscataway NJ: Wiley-IEEE Press, 2011: 25-66.
- [35] Li D P, Song D, Xu R Q. A mainlobe interference suppression system based on mismatched filtering[C]//2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway NJ: IEEE, 2010: 233-238.
- [36] Lan L, Liao G S, Xu J W. A method to suppress the main-beam deceptive jamming in FDA-MIMO radar with random polyphase codes[C]//2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Piscataway NJ: IEEE, 2018: 509-513.
- [37] Xu J W, Liao G S, Zhu S Q, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. Elsevier Journal of Signal Processing, 2015, 113(8): 9-17.
- [38] Liu Y, Ruan H, Wang L, 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.
- [39] Li S, Zhang L, Liu N, et al. Adaptive detection with conic rejection to suppress deceptive jamming for frequency diverse MIMO radar[J]. Digital Signal Processing, 2017, 69: 32-40.
- [40] Xu J W, Zhu S Q, Liao G S. Space-time-range adaptive processing for airborne radar systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1602-1610.
- [41] Wang B, Xie J W, Zhang J, et al. Beamforming analysis based on CSB sin-FDA[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(1): 73-84.
- [42] Li Z H, Zhang Y S, Ge Q C, et al. A robust deceptive jamming suppression method based on covariance matrix reconstruction with frequency diverse array MIMO radar[C]//Processing of 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway NJ: IEEE, 2018: 1-5.
- [43] Xu J W, Zhu S Q, Liao G S. Range ambiguous clutter suppression for airborne FDA-STAP radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(8): 1620-1631.
- [44] Wu X, Liu Z, Xie R. Clutter suppression for hypersonic vehicle-borne radar with frequency diverse array[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(3): 481-492.
- [45] Farina A. Electronic counter-countermeasures[M]//Skolnik M. Radar Handbook. 3rd ed. New York: Mc Graw-Hill, 2008: 221-278.
- [46] Li N, Zhang Y. A survey of radar ECM and ECCM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31(3): 1110-1120.
- [47] Wang W Q, Cai J. A technique for jamming bi- and multistatic SAR systems[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 80-82.
- [48] 胡祺勇, 谢军伟, 张昭建. 频率分集阵列在角度欺骗中的应用分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 10(6): 41-47.
- [49] 葛佳昂, 谢军伟, 张浩为, 等. 频率分集阵列对干涉仪的角度欺骗效果[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 183-191.
- [50] 王博, 谢军伟, 葛佳昂, 等. FDA发射干扰机对无源雷达干涉仪测向系统的欺骗机理[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 93-103.
- [51] 王博, 谢军伟, 葛佳昂, 等. FDA对比幅法单脉冲测向的角度欺骗[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 643-650.
- [52] Ge J A, Xie J W, Wang B. A cognitive active anti-jamming method based on frequency diverse array radar phase center[J]. Digital Signal Processing, 2021, 109: 102915.
- [53] Zhu Y, Wang H, Zhang S S, et al. Deceptive jamming on space-borne SAR using frequency diverse array[C]//2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway NJ: IEEE, 2018: 605-608.
- [54] 明靖鸥. 基于频控阵的雷达干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [55] 汪辉. 基于频控阵的雷达干扰技术研究实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [56] Huang B, Wang W Q, Zhang S S, et al. A novel approach for spaceborne SAR scattered-wave deception jamming using frequency diverse array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 17(9): 1568-1572.
- [57] Wang H, Zhang S S, Wang W Q, et al. Multi-scene deception jamming on SAR imaging with FDA antenna[J]. IEEE Access, 2020, 4(8): 7058-7069.
- [58] Huang B, Nusenu S Y, Zhang S S, et al. A deceptive jamming against high and low orbit bistatic SAR using frequency diversity array[C]//2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR). Piscataway NJ: IEEE, 2019: 1-5.
- [59] Zong Z L, Huang L B, Wang H, et al. Micro-motion deception jamming on sar using frequency diverse array [C]//2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway NJ: IEEE, 2019, 2391-

- 2394.
- [60] Khan W, Qureshi I M, Basit A, et al. A double pulse MIMO frequency diverse array radar for improved range-angle localization of target[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 82: 2199–2213.
- [61] Sen S. PAPR-constrained pareto-optimal waveform design for OFDM-STAP radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3658–3669.
- [62] Sammartino P F, Backer C J, Griffiths H D. Range-angle dependent waveform[C]//2010 IEEE Radar Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2010: 511–515.
- [63] Wang W Q. Phased-MIMO radar with frequency diversity for range dependent beamforming[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(4): 1320–1328.
- [64] Xu J, Zhu S, Liao G. Space-time-range adaptive processing for airborne radar systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(3): 1602–1610.
- [65] Yao A, Anselmi A, Rocca P. A novel planar frequency diverse array design approach for far-field wireless power transmission[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 9–14.
- [66] Saeed S, Qureshi I M, Khan W, et al. An investigation into uniform circular frequency diverse array (UCFDA) radars[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(9): 707–714.
- [67] Cetintepe C, Demir S. Multipath characteristics of frequency diverse arrays over a ground plane[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3567–3574.
- [68] Baizert P, Hale T B, Temple M A, et al. Forward looking radar GMTI benefits using a linear frequency diverse array[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(22): 1311–1312.
- [69] Farooq J, Temple M A, Saville M A. Application of frequency diverse arrays to synthetic aperture radar imaging [C]//Processing of 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Piscataway NJ: IEEE, 2007: 447–449.
- [70] Wang W Q. Space-time coding MIMO-OFDMSAR for high-resolution imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3094–3104.
- [71] Hu J, Yan S, Shu F, et al. Artificial-noise-aided secure transmission with directional modulation based on random frequency diverse arrays[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 1658–1667.
- [72] Liu Y. Range azimuth indication using a random frequency diverse array[C]//Processing 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech Signal Process. Piscataway NJ: IEEE, 2016: 3111–3115.
- [73] Wang W Q. Cognitive frequency diverse array radar with situational awareness[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 359–369.
- [74] Saeed S, Qureshi I M, Basit A, et al. Cognitive null steering in frequency diverse array radars[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2017, 9(1): 25–33.
- [75] Huang H, Wang W Q. FDA-OFDM for integrated navigation, sensing, and communication systems[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2018, 33(5/6): 34–42.
- [76] Xu Y H, Shi X W, Xu J W, et al. Range-angle-dependent beamforming of pulsed frequency diverse array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(7): 3262–3267.
- [77] Gao K, Wang W Q, Chen H, et al. Transmit beam space design for multi-carrier frequency diverse array sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(14): 5709–5714.
- [78] Khan W, Qureshi I M. Frequency diverse array radar with time dependent frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014(13): 758–761.
- [79] Wang Y X, Li W, Huang G C, et al. Time-invariant range-angle dependent beam pattern synthesis for FDA radar targets tracking[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2375–2379.
- [80] Yao A M, Rocca P, Wu W, et al. Synthesis of time-modulated frequency diverse arrays for short-range multi-focusing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 282–294.
- [81] Yao A M, Wu W, Fang D G. Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beam pattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4434–4446.
- [82] Yao A M, Wu W, Fang D G. Solutions of time-invariant spatial focusing for multi-targets using time modulated frequency diverse antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 552–566.
- [83] Fang D G, Yao A G, Wu W. Synthesis of 4-D beam patterns using 4-D arrays[C]//2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Piscataway NJ:

- IEEE, 2016: 703–704.
- [84] Shi J, Liu X, Yang Y H, et al. Comments on "Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar"[J]. *Signal Processing*, 2019, 158: 1–3
- [85] Fartookzadeh M. Comments on "Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beam-pattern"[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 1211–1212.
- [86] Wu W, Fang D G. Reply to comments on "Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beam-pattern"[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 1213–1213.
- [87] Chen B X, Chen X L, Huang Y. et al. Transmit beam-pattern synthesis for the FDA radar[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 98–101.
- [88] 王博, 谢军伟, 张晶等. 脉冲压缩雷达信号的FDA特性研究[J]. *电子科技大学学报*, 2020, 49(1): 56–63.
- [89] Wang W Q, Dai M, Zheng Z. FDA radar ambiguity function characteristics analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1368–1380.
- [90] Mai C Y, Lu S T, Sun J P, et al. Beampattern optimization for frequency diverse array with sparse frequency waveforms[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17914–17926.
- [91] Han S D, Fan C Y, Huang X T. A novel receiver architecture for frequency diverse array radar[C]//2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium. Piscataway NJ: IEEE, 2016: 2270–2274.
- [92] Gui R, Wang W Q, Cui W Q, et al. Coherent pulsed-FDA radar receiver design with time-variance consideration: SINR and CRB analysis[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(1): 200–214.
- [93] Xu J W, Lan L, Liao G S, et al. Range-angle matched receiver for coherent FDA radars[C]//2017 IEEE Radar Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 0324–0328.
- [94] Gui R, Wang W Q, Shao H. General receiver design for FDA radar[C]//2018 IEEE Radar Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2018: 23–27.
- [95] Vakalis S, Klinefelter E, Nanzer J A. Angle estimation using wideband frequency modulation and an active distributed array[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(11): 1059–1061.
- [96] 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.

Overview of the research progress of frequency diverse array radar

WANG Bo^{1,2}, CHEN Chushu², GUO Yajun¹, LIU Naibo¹, XU Zehua¹

1. No. 95972 of Chinese People's Liberation Army, Jiuquan 735300, China

2. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract Different from the phased array in which the beam direction is controlled by phase difference between array elements, the frequency diversity array (FDA) radar can realize beam control with higher degree of freedom by introducing frequency difference between array elements. This paper summarizes the research progress of FDA radar at home and abroad, and analyzes its current research status from aspects of array structure and orientation graphic coupling technology, electronic countermeasure technology application, electronic countermeasure technology application and so on. On this basis, some key technical problems to be solved, such as uncoupled FDA time-varying beam control, FDA-based electronic warfare technology and FDA-based radar practical research, are analyzed. For actual combat application of FDA, it is needed to develop a feasible time-invariant FDA distance-angle decoupling method of the beam and carry out integrated application research concerning FDA based structural analysis, launch waveform and frequency control function design, so as to speed up the process of FDA radar from conceptual stage to combat application.

Keywords frequency diversity array; decoupling; new system radar; array design ●



(责任编辑 王志敏)