

## 频控阵雷达技术及其应用研究进展

王文钦<sup>\*①</sup> 陈 慧<sup>①</sup> 郑 植<sup>①</sup> 张顺生<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

<sup>②</sup>(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)

**摘 要:** 与传统的相控阵只形成方位角依赖性的发射波束不同, 频控阵通过在阵元间采用一个小频差来实现波束的自动扫描功能。频控阵能够形成具有距离依赖性和时变性的发射波束, 克服了传统相控阵阵列因子不包含距离和时间变量的缺点, 因而带来很多独特的应用优势。该文在作者的“频控阵雷达: 概念、原理与应用”(《电子与信息学报》, 2016, 38(4): 1000–1011)基础上, 简要介绍频控阵雷达的基本原理, 全面梳理近3年来国内外关于频控阵雷达技术及其应用方面的最新研究进展, 讨论几种新的频控阵雷达技术应用前景, 主要包括雷达对抗和雷达-通信一体化应用, 并指出目前亟待研究解决的波束时变性、有效接收机设计、自适应信号检测与估计和原理样机研制等几个关键问题。

**关键词:** 频控阵; 频控阵雷达; 雷达对抗; 雷达-通信一体化; 干扰抑制; 新体制雷达

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2018)02-0153-14

**DOI:** 10.12000/JR18029

**引用格式:** 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.

**Reference format:** 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.

## Advances on Frequency Diverse Array Radar and Its Applications

Wang Wenqin<sup>①</sup> Chen Hui<sup>①</sup> Zheng Zhi<sup>①</sup> Zhang Shunsheng<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Unlike the conventional phased array that provides only angle-dependent transmit beampattern, Frequency Diverse Array (FDA) employs a small frequency increment across its array elements to produce automatic beam scanning without requiring phase shifters or mechanical steering. FDA can produce both range-dependent and time-variant transmit beampatterns, which overcomes the disadvantages of conventional phased arrays that produce only angle-dependent beampattern. Thus, FDA has many promising applications. Based on a previous study conducted by the author, “Frequency Diverse Array Radar: Concept, Principle and Application” (*Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 1000–1011), the current study introduces basic FDA radar concepts, principles, and application characteristics and reviews recent advances on FDA radar and its applications. In addition, several new promising applications of FDA technology are discussed, such as radar electronic warfare and radar-communications, as well as open technical challenges such as beampattern variance, effective receiver design, adaptive signal detection and estimation, and the implementation of practical FDA radar demos.

**Key words:** Frequency Diverse Array (FDA); FDA radar; Radar electronic warfare; Radar-communications; Interference suppression; New radar scheme

收稿日期: 2018-04-03; 改回日期: 2018-04-23; 网络出版: 2018-04-28

\*通信作者: 王文钦 wqwang@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501781)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61501781)

## 1 引言

为了弥补相控阵阵列因子与距离变量无关的缺点,美国空军研究实验室的Antonik和Wicks等人<sup>[1-3]</sup>提出一种具有距离依赖性方向图的FDA(Frequency Diverse Array)新概念技术,并提出一种结合空间、时间和频率调制的FDA雷达系统。FDA直译应为频率复用阵列,但笔者认为从其工作原理上讲译作频控阵更为恰当<sup>[4]</sup>。这是因为频控阵和相控阵一样发射相参信号,只是经过附加很小的频偏(频偏远远小于其载频)控制后辐射出去的信号频率中心有所偏移,但其主要频率成分是重叠的,这与OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)<sup>[5]</sup>和MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)<sup>[6-10]</sup>所要求的频率正交性要求是不同的。也就是说,频控阵和相控阵具有相似的物理特性,可以将频控阵看作是相控阵的一种扩展,而相控阵是频控阵的一种特例。

频控阵与传统相控阵的主要差别是前者的各阵元采用不同的发射信号载频,而后的各阵元一般采用相同的发射信号载频。频控阵所采用的阵元间频偏将导致其空间传播波束不但与方位角有关,也与距离有关。因此,除了具有相控阵的所有功能特性,频控阵在目标探测、干扰抑制、电子对抗和安全通信等领域也具有广泛的应用潜力。近年来,频控阵雷达技术受到国内外的广泛研究关注:2014年,美国空军研究实验室研制出一款频控阵雷达原型机,验证了频控阵雷达的发射波束传播特性。2015年,土耳其也研制出频控阵雷达原理样机。2017年,国际信号处理领域顶级期刊《IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing》组织出版了频控阵技术方面的专刊<sup>[11]</sup>。2017年和2018年的IEEE雷达学术年会均安排有频控阵雷达专题讨论分会。可见,频控阵技术已经成为一个研究热点,但还存在诸多技术难点亟待研究解决。为此,在作者的“频控阵雷达:概念、原理与应用”(《电子与信息学报》,2016,38(4):1000-1011)一文基础上,本文全面梳理近3年来国内外关于频控阵雷达技术及其应用方面的最新研究进展,讨论频控阵在雷达对抗和雷达-通信一体化等几种新领域方面的应用潜力,并指出其亟待研究解决的关键问题,以期进一步推动频控阵雷达技术及其应用方面的研究进展。

本文的结构安排如下:第2节简要介绍频控阵的基本原理和基本特点,第3节综述频控阵雷达技术及其应用方面的最新研究进展。第4节和第5节分别讨论频控阵技术在雷达对抗和雷达-通信一体化

等方面的应用前景和亟待解决的关键技术问题。第6节总结全文。

## 2 频控阵的基本原理

### 2.1 频控阵的信号模型

由于频控阵是一种相对较新的阵列技术,我们首先对频控阵的信号模型作简要的推导分析。与相控阵不同,常规频控阵在相邻阵元上对发射信号附加一个远小于其载频的频率偏移 $\Delta f$ 。假设载频为 $f_0$ ,则第 $m$ 个阵元辐射信号的频率为:

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

式中, $M$ 为阵元数。假设相邻阵元之间的距离为 $d$ 和阵列物理指向 $\theta$ ,则频控阵的辐射波束方向图在目标处的电场场强为<sup>[12]</sup>:

$$E = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{\alpha_m}{r_m} e^{j\psi_m} e^{j(\omega_m t - k_m r_m)} f_e(\theta | \omega_m) \quad (2)$$

式中, $\alpha_m$ 表示辐射电场的激励幅度, $\psi_m$ 表示信号对天线阵元的激励相位, $r_m \approx r - md \sin \theta$ 和 $\omega_m = \omega_0 + m\Delta\omega = 2\pi f_0 + 2\pi m\Delta f$ 分别表示第 $m$ 个阵元的距离和角频率, $k_m = k_0 + m\Delta k$ 表示第 $m$ 个阵元的传播常数,其中 $k_0$ 为对应 $f_0$ 的传播常数。值得一提的是, $f_e(\theta | \omega_m)$ 是当角频率为 $\omega_m$ 时的阵元辐射方向图函数。由于频控阵阵元的辐射方向图函数是频率的函数,而且频控阵是一个多载波频率的阵列,其阵元的辐射方向图有可能是不同的。由于频控阵不同阵元间的频率偏移很小( $\Delta f \ll f_0$ ),本文假设在频控阵带宽内的阵元辐射方向图是近似相等的,即 $f_e(\theta | \omega_m) \approx f_e(\theta | \omega_0) = f_e(\theta)$ 。

同时,在远场情况下,由于 $r_m \gg (M-1) \cdot d \sin \theta$ ,我们可以认为距离衰减对所有阵元具有相等的电场幅度影响。因此,式(2)可以表征为:

$$E = \frac{f_e(\theta)}{r} e^{j(\omega_0 t + k_0 r)} \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_m e^{j\psi_m} \cdot e^{j(m\Delta\omega t + m\Delta k r - k_0 m d \sin \theta - m^2 \Delta k d \sin \theta)} \quad (3)$$

定义

$$\gamma_{\text{FDA}} = m\Delta\omega t + m\Delta k r - k_0 m d \sin \theta - m^2 \Delta k d \sin \theta \quad (4)$$

式(3)则可表示为:

$$E = \frac{f_e(\theta)}{r} e^{j(\omega_0 t + k_0 r)} \sum_{m=0}^{M-1} w_m e^{jm\gamma_{\text{FDA}}} = \frac{f_e(\theta, \varphi)}{r} e^{j(\omega_0 t + k_0 r)} \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta, r, t) \quad (5)$$

式中, $w_m = \alpha_m e^{j\psi_m}$ , $\mathbf{H}$ 为共轭转置, $\mathbf{w} =$

$[w_1 w_2 \cdots w_M]^T$  为加权矢量, 包含了所有的阵元加权因子,  $\mathbf{a}(\theta, r, t) = [1 e^{j\gamma_{\text{FDA}}} \cdots e^{j(M-1)\gamma_{\text{FDA}}}]^T$  为频

$$E = \frac{e^{j\Phi_0}}{r} \frac{\sin \left\{ M\pi \left( \Delta f t - \frac{\Delta f r}{c_0} + \frac{f_0 d \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0} \right) \right\}}{\sin \left\{ \pi \left( \Delta f t - \frac{\Delta f r}{c_0} + \frac{f_0 d \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0} \right) \right\}} \quad (6)$$

式中,  $c_0$  为光速, 相位因子  $\Phi_0 = 2\pi f_0(t - r/c_0) - \pi(M-1)(\Delta f r - f_0 d \sin \theta - \Delta f d \sin \theta - \Delta f t)/c_0$ 。式(6)表明: 频控阵的辐射方向图依赖角度  $\theta$ 、距离  $r$  和时间  $t$ , 而传统的相控阵( $\Delta f = 0$ )的辐射方向图只依赖角度。

假设给定时间  $t = 0$ ,  $M = 8$ ,  $f_0 = 10$  GHz,  $\Delta f = 30$  kHz,  $d = c_0/(2f_0)$  和目标位置为  $(0^\circ, 10 \text{ km})$ , 图1给出频控阵的距离-方位角2维空间波束方向图。可见, 频控阵的辐射方向图不仅具有距离和方位角依赖性, 而且具有“S”形的距离和方位角耦合性。这是因为频控阵频偏  $\Delta f$  带来的等效阵列指向  $\theta_e$  可表示为<sup>[14]</sup>:

$$\theta_e = \arcsin \left( \frac{f_0 \sin \theta}{f} + \frac{\Delta f \sin \theta}{f} - \frac{\Delta f r}{fd} \right) \quad (7)$$

因此, 虽然频控阵波束的距离依赖性可以拓展雷达的目标探测能力, 但需解决距离和方位角耦合问题。

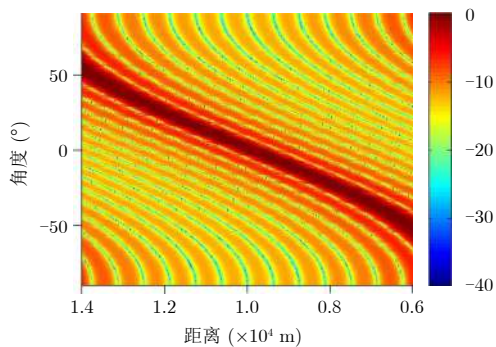


图1 频控阵的发射波束方向图

Fig. 1 Transmit beampattern of FDA antenna

## 2.2 频控阵的主要特点

频控阵的最主要特点是其阵列因子具有距离依赖性、时变性和自动扫描特性。由于频控阵波束的距离依赖性已经受到广泛的研究关注<sup>[15-20]</sup>, 这里只介绍波束的时变性和自动扫描特性。

**2.2.1 时变性** 为了更好地分析频控阵的时变性, 我们假设每个阵元发射的是矩形脉冲信号:

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_1 \leq t \leq t_2 < 1/\Delta f \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $t_1$  和  $t_2$  分别为脉冲信号的起始和截止时间。

控阵的导向矢量, 其中T为转置。当采用均匀加权时, 则其发射波束辐射图可近似推导为<sup>[13]</sup>:

对于连续波信号发射情况, 则有  $t_1 = 0$  和  $t_2 \rightarrow \infty$ 。依据式(6), 频控阵的发射波束峰值会出现在

$$\Delta f t - \frac{\Delta f r}{c_0} + \frac{f_0 d \sin \theta}{c_0} + \frac{\Delta f d \sin \theta}{c_0} = n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

进而可得

$$\sin \theta = \frac{c_0 n - c_0 \Delta f t + \Delta f r}{(f_0 - \Delta f) d}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

对于给定的距离  $r$  和方位角  $\theta$ , 频控阵发射波束的幅度也具有时变性, 即其波束指向具有时变性。

假设频控阵在时刻  $t_1$  和  $t_2$  时的波束指向分别为  $\hat{\theta}_1$  和  $\hat{\theta}_2$ , 则可得

$$\sin \hat{\theta}_1 - \sin \hat{\theta}_2 = \frac{\Delta f (t_1 - t_2)}{(f_0 - \Delta f) d} = \frac{\Delta f T_p}{(f_0 - \Delta f) d} \quad (11)$$

式中,  $T_p = t_1 - t_2$  为频控阵发射信号的脉冲宽度。式(11)表明, 脉冲频控阵雷达的发射波束也具有脉内时变性。

假设  $T_p = 1$  ns,  $\Delta f = 1$  kHz 和阵元间距为半波长, 则有  $\sin \hat{\theta}_1 - \sin \hat{\theta}_2 = 2 \times 10^{-6}$ 。这说明频控阵发射波束的脉内时变性可以忽略, 但其脉间时变性不能忽略, 如图2所示。

**2.2.2 自动扫描特性** 将式(10)等号两边对时间  $t$  求导, 可得

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{-c_0 \Delta f}{(f_0 - \Delta f) d \cos \theta} \quad (12)$$

相应地, 频控阵等效瞬时波束在时间  $t \in [t_1, t_2]$  内的扫描方位角范围为:

$$\bar{\theta} = \frac{-c_0 \Delta f (t_2 - t_1)}{(f_0 - \Delta f) d \cos \theta} \quad (13)$$

这意味着频控阵的等效波束能够在  $t_2 - t_1 = [2(f_0 - \Delta f) d] / (c_0 \Delta f)$  时间内完成方位角  $0^\circ \sim 180^\circ$  的自动扫描(即频控阵的瞬时波束指向和其物理指向是不一定相等的, 而相控阵的瞬时波束指向和其物理指向是相等的), 但频控阵波束的重复周期为  $1/\Delta f$ 。因此, 频控阵雷达的脉冲重复时间间隔  $T_i$  应该设计为  $T_i \geq 1/\Delta f$ 。

## 3 频控阵雷达技术的最新研究进展

自2006年Antonik等人提出频控阵雷达概念技



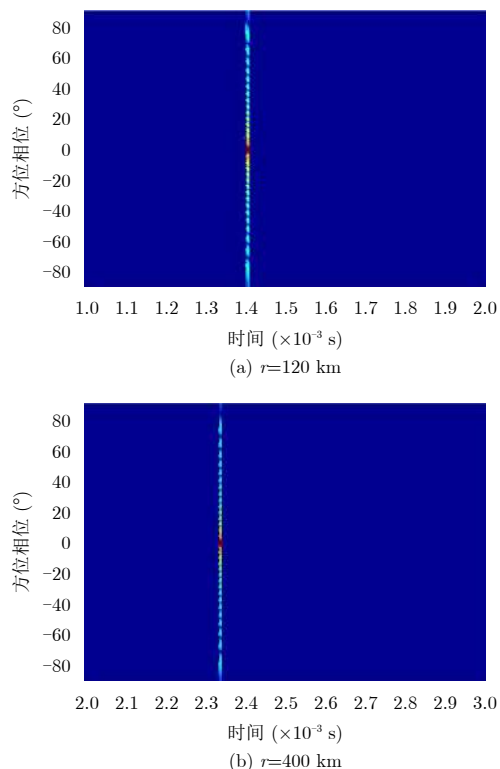


图 2 频控阵发射波束的脉内与脉间时变对比

Fig. 2 Time-variance of FDA transmit beampattern in pulse duration and pulse repetition interval

术以来, 该技术已引起广泛的研究关注<sup>[21-31]</sup>, 并进行了试验测试<sup>[23]</sup>。由于笔者已经在2016年初发表的“频控阵雷达: 概念、原理与应用”一文<sup>[4]</sup>中对2006年-2015年期间的频控阵雷达研究情况作了较全面的梳理和归纳, 本文主要讨论2016至今的近3年来频控阵雷达技术最新研究进展情况。

### 3.1 频控阵发射方向图综合设计方面

为了抑制频控阵发射方向图的距离-方位角耦合问题, Khan等人<sup>[32]</sup>提出一种采用对数频偏的去耦合方法, 可以实现频控阵在传播空间中出现能量不连续的点波束, 但这种方法的非线性频偏递增缓慢, 而且波束的聚焦效果并不明显。为此, 我们提出采用指数增长频偏的去耦合方法<sup>[33]</sup>, 即第 $m$ 个阵

元的频偏为 $\Delta f_m = m^\eta \Delta f$ 。当 $\eta = 1$ 时, 为常规频控阵; 当 $\eta = 0$ 时, 为相控阵。假设 $f_0 = 10 \text{ GHz}$ ,  $d = c_0 / (2f_0)$ ,  $M = 16$ ,  $\Delta f = 3 \text{ kHz}$ 和目标位置为 $(10^\circ, 10 \text{ km})$ 。图3比较了采用不同非线性频偏时的频控阵发射方向图。可见:  $\eta$ 越大, 则波束越聚焦, 但其旁瓣电平也越高。这是由于非线性频率偏移破坏了频控阵的栅瓣分布规律, 非线性越大, 频率偏移也越大, 造成了栅瓣靠近了主瓣。同时, 由非线性频偏破坏了原来规整的栅瓣组合规律而形成新的波束栅瓣。进而, Liu等人<sup>[34]</sup>提出采用随机频偏的频控阵发射波束去耦合方法, 但其缺点是在实际系统中并不能实现随机频偏配置。

为了更好地解决频控阵波束的距离-方位角耦合问题, “点”波束方向图综合已成为研究热点<sup>[35]</sup>: Shao等人<sup>[36]</sup>提出一种基于多载波的频控阵“点”状发射波束方向图综合方法。该方法采用了最简单的均匀加权, 没有考虑频控阵阵列因子时变因素的影响, 只是验证了频控阵可以在距离-方位角空间中形成点状波束方向图。值得说明的是, 频控阵波束的耦合性和时变性并不一定是频控阵的缺点, 只是不同应用场合可能需要利用其不同的阵列特性。为此, Gao等人<sup>[37]</sup>进一步提出考虑时变因素影响下的频控阵点波束方向图综合方法。在此基础上, Xiong等人<sup>[38]</sup>提出一种基于遗传算法的频控阵点状波束方向图优化设计方法。

为了解决频控阵发射波束的时变性, Khan等人<sup>[39]</sup>提出采用时变频偏的解决思路。Yao等人<sup>[40]</sup>提出采用时间调制频偏的频控阵时不变空间聚焦波束形成方法, 并将其推广到多点时不变聚焦<sup>[41]</sup>和近距多点时不变聚焦<sup>[42]</sup>发射波束形成方法。在此基础上, Cheng等人<sup>[43]</sup>进一步引入阵列指向调制技术来设计时不变频控阵发射波束, Yang等人<sup>[44]</sup>提出基于稀疏频控阵<sup>[45]</sup>的时不变聚焦波束形成方法, 但文献<sup>[46]</sup>指出上述方法在工程实现中存在诸多问题。此外, 将当前针对相控阵的阵列方向图综合新方法应用到频控阵中也是一个研究热点<sup>[47-50]</sup>。

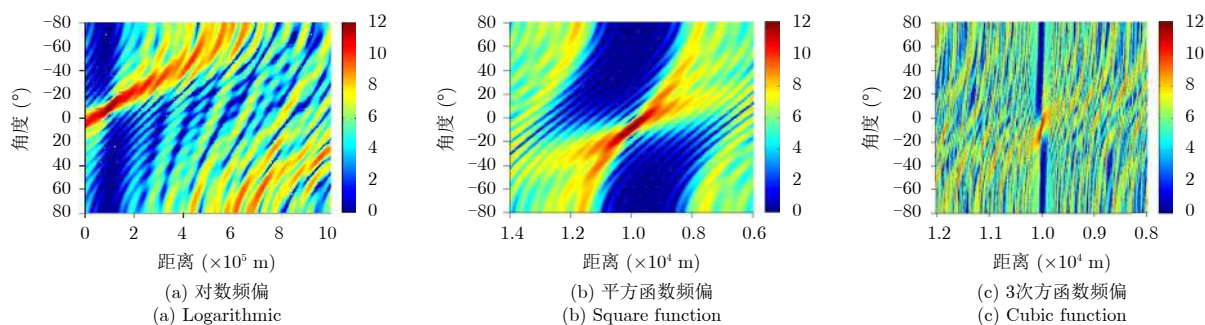


图 3 不同非线性频偏时的频控阵发射方向图对比

Fig. 3 Comparisons of transmit beampattern under different nonlinearly increasing frequency offsets

### 3.2 频控阵雷达目标探测方面

频控阵发射波束的距离依赖性能够拓展现有阵列探测能力, 有望应用于检测/抑制距离依赖性目标/干扰, 以及多径甚至主瓣干扰抑制, 所以目标距离-方位角联合估计是当前频控阵雷达研究中的一个热点。Sammartino等人<sup>[51]</sup>提出一种基于频控阵的双站雷达系统, 并引入非线性频偏和MIMO配置, 其主要目的是增加雷达系统的自由度。Wang等人提出使用双脉冲<sup>[52]</sup>或子阵技术<sup>[53]</sup>的频控阵雷达目标检测与定位方法, 进而分析了频控阵雷达的模糊函数特性及其优化设计方法<sup>[54]</sup>, 并提出基于嵌套阵的频控阵雷达目标距离和角度联合估计方法<sup>[55]</sup>。Li等人<sup>[56]</sup>提出一种通过无模糊识别频域模式的频控阵雷达目标定位方法。Qin等人<sup>[57]</sup>提出采用互质频偏的频控阵雷达多目标定位方法。

为了彻底解决频控阵雷达目标探测应用中由距离-方位角耦合性带来的目标参数估计模糊问题, 有必要综合利用频控阵的距离依赖性和MIMO阵列的自由度, 构建新体制的FDA-MIMO技术。需要说明的是, 虽然基于频率波形复用的MIMO和FDA-MIMO具有相似性, 但它们在物理本质上是不同的。前者的频偏主要用来分离不同发射天线的信号, 因而需要其频偏足够大; 而后的频偏很小, 远小于其发射信号的带宽。虽然前者在空间上也可以形成距离相关性波束, 但其大频偏会形成大量栅瓣, 导致能量发散和增加目标参数估计难度。Xu等人<sup>[58]</sup>提出基于FDA-MIMO的雷达目标距离和方位角联合估计方法, 并进而提出一种基于自适应FDA-MIMO雷达的目标3维参数估计方法<sup>[59]</sup>。由于CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)是一种常见的目标参数估计性能评估手段, Gao等人<sup>[60]</sup>提出基于CRLB最小化的FDA-MIMO优化设计方法。在此基础上, Xiong等人<sup>[61]</sup>推导了FDA-MIMO雷达在目标距离-方位角联合估计中的CRLB、MSE(Mean of Square Error)和分辨力特性, 其结果表明FDA-MIMO雷达能够综合利用频控阵雷达和MIMO雷达的优势。

为了避免频控阵雷达目标距离-方位角联合估计中的多维峰值搜索估计复杂度, Cui等人<sup>[62]</sup>提出针对双基FDA-MIMO雷达的无搜索DOD(Direction Of Departure)、DOA(Direction Of Arrival)和距离估计算法。Li等人<sup>[63]</sup>分析指出FDA-MIMO雷达在低空波束覆盖能力方面具有应用优势, 并提出基于面阵FDA-MIMO雷达的目标3维参数联合估计方法<sup>[64]</sup>。Gong等人<sup>[65]</sup>将稀疏信号处理技术应用到

FDA-MIMO雷达中。由于上述方法均未考虑频控阵雷达目标响应的时变性影响问题, Gui等人<sup>[66]</sup>提出一种基于频控阵雷达时变性考虑的多通道相关接收处理模型, 并分析了其SINR(Signal-plus-Interference-to-Noise Ratio)和CRLB性能。

Xu等人<sup>[67]</sup>分析指出频控阵雷达在抗欺骗干扰方面具有明显优势, 提出采用频控阵雷达接收-发射联合处理解决目标距离估计中的模糊问题<sup>[58]</sup>。由于频控阵可以提供一个可控的额外自由度, 目标可以从距离相关的干扰和杂波中分离出来, 通过距离-方位角-多普勒3个维度的联合处理, 频控阵雷达可以抑制距离相关性干扰和杂波, 再采用空时自适应处理来分辨出距离模糊杂波<sup>[68,69]</sup>, 并将该方法应用到运动目标检测<sup>[70]</sup>和合成孔径雷达成像<sup>[71,72]</sup>。

此外, 受认知雷达研究热潮的影响, 认知频控阵雷达也受到研究关注<sup>[73,74]</sup>。Wang<sup>[75]</sup>提出一种具有环境自适应感知的认知频控阵雷达概念技术, 以及具有自适应射频隐身功能的频控阵雷达运动目标跟踪方法<sup>[76]</sup>。在此基础上, Xiong等人<sup>[77]</sup>提出一种具有低截获概率特性的认知频控阵雷达概念技术, Gui等人<sup>[78]</sup>提出一种基于FDA-MIMO的认知运动目标检测与跟踪方法。

### 3.3 频控阵雷达原型机和试验验证方面

美国空军研究实验室的Antonik等人研制出单频频控阵雷达发射模块(见图4<sup>[3]</sup>), 并进行了外场测试。英国的Huang的等人<sup>[25]</sup>设计一个4阵元的频控阵雷达天线, 如图5所示。2015年土耳其其中东理工大学研制了一款基于线性调频波信号的频控阵雷达原型机<sup>[79]</sup>, 并通过试验验证了频控阵雷达波束方向图的时间相关性和距离相关性<sup>[80]</sup>, 如图6所示。此外, 美国空军研究实验室在2016年公开了一个基于频控阵的物理层安全通信试验平台, 如图7所示。笔者研究团队2017年也研制了针对频控阵雷达的多通道信号源和频控阵天线, 并开发了能够满足频控阵雷达系统仿真与数据处理的软件平台“频控阵雷达仿真与处理系统”, 如图8所示。

综上所述, 频控阵雷达技术及其应用已经引起国内外广泛的研究关注, 并成为2017年和2018年IEEE雷达学术年会的专题讨论会。目前, 国内也有不少研究单位在从事该方面的研究, 例如电子科技大学、西安电子科技大学、清华大学、空军工程大学、雷达预警学院和南京理工大学等。现有研究结果表明频控阵具有广泛的应用前景, 但在硬件实现、自适应信号处理和系统验证方面还存在许多亟待研究解决的关键问题。





(a) 发射模块  
(a) Transmitter



(b) 接收模块  
(b) Receiver

图 4 Antonik 等人研制的单频频控阵雷达发射和接收模块<sup>[3]</sup>

Fig. 4 Antonik *et al.* designed monochromatic FDA radar modules<sup>[3]</sup>

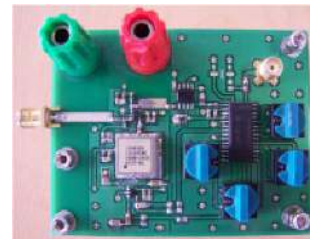
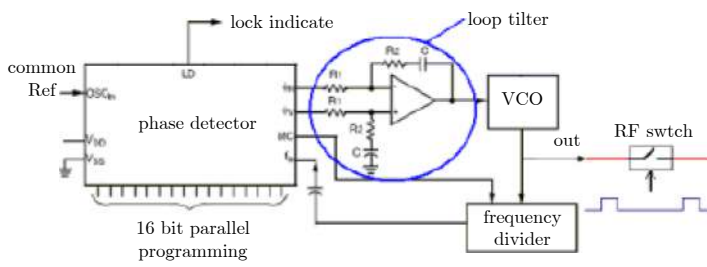


图 5 英国Huang设计的频控阵雷达发射阵列模块<sup>[25]</sup>

Fig. 5 Huang in UK designed FDA transmitting array module<sup>[25]</sup>

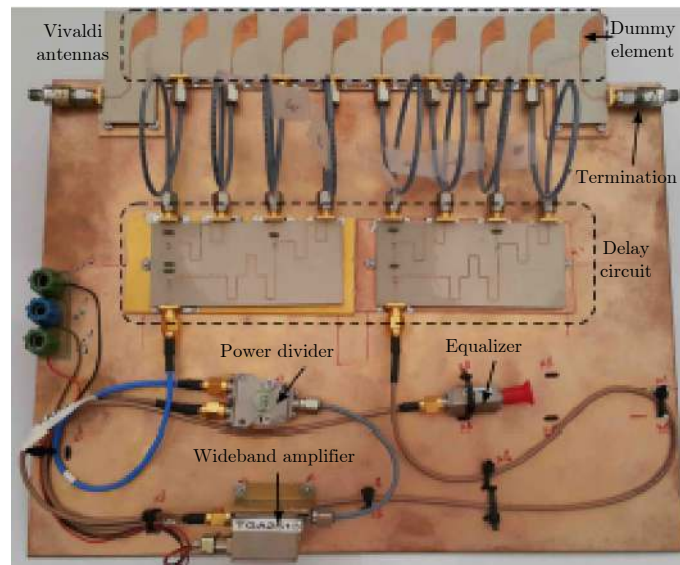


图 6 土耳其中东理工大学研制的频控阵雷达原型机模块<sup>[79,80]</sup>

Fig. 6 Turkey Middle East Technical University designed FDA radar demos<sup>[79,80]</sup>

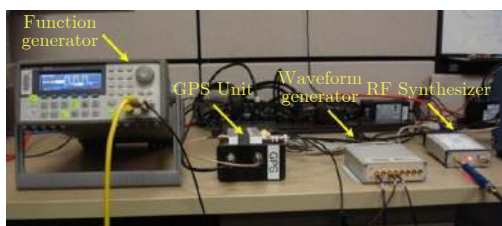


图 7 美国国防研究报告网站公开的基于频控阵的物理层安全通信试验平台

Fig. 7 U.S. defense research report discloses a physical-layer safety communication test platform based on FDA

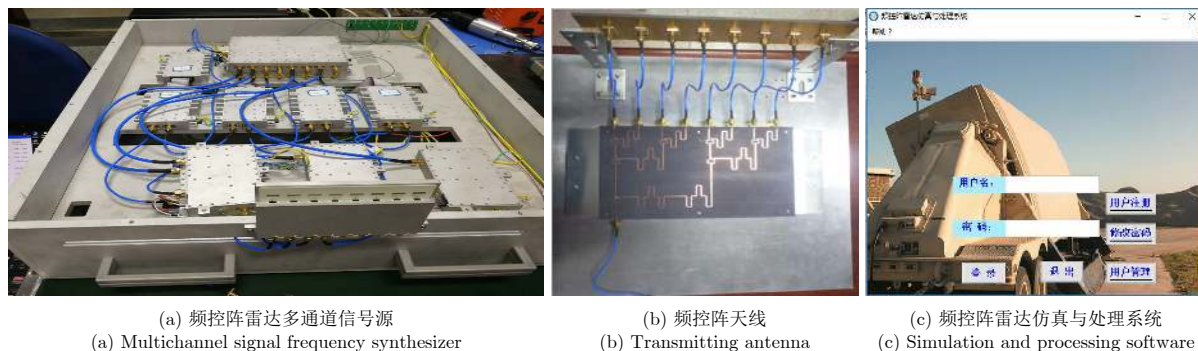


图8 笔者研究团队研制的频控阵雷达信号源、天线，以及仿真与处理系统

Fig. 8 FDA radar frequency synthesizer, antenna and software designed by the author's research group

#### 4 频控阵雷达技术的应用前景展望

频控阵不但具有相控阵的所有功能优势，而且其发射波束的距离依赖性、距离-方位角耦合性和空变特性，有望给现有的有源雷达探测技术、无源被动侦测技术和电子对抗与干扰技术带来颠覆性的影响。频控阵的主要应用特点体现在以下几个方面：

(1) 具有射频隐身和低截获能力：频控阵发射波束图具有可控的“弯曲”特性，容易使得其被侦察测向定位失准，大大降低其被探测和攻击的概率，从而实现一定程度的射频隐身效果。而且，我们还可以通过频控阵各阵元的频偏进行特殊编码，使阵列瞬时辐射功率在距离-方位角空间尽可能均匀分布，并通过特定的相位调制来降低发射信号被截获解调的概率，最后在接收端通过波束的相位解码和接收波束形成恢复出高增益的发射阵列方向图，则有望进一步提高频控阵有源探测装备的射频隐身能力。

(2) 具有强抗干扰抑制应用能力：传统相控阵雷达往往利用空域自由度，对副瓣干扰具有较好的抑制效果。但是，当雷达面临强干扰或主瓣干扰时，传统基于空域滤波的副瓣干扰抑制方法性能将严重下降，甚至失效，此时现有雷达装备很难对目标进行有效探测。频控阵不同阵元发射载频具有偏差的相同信号，其方向图具有距离-角度2维自由度，具有强抗干扰抑制应用潜力。

(3) 多径干扰自适应抑制能力：频控阵波束的阵列因子包含有角度、距离和时间3个变量，充分挖掘和利用这3种变量关系，尤其是其时间特性，有可能提出基于时域处理的多径干扰抑制方法，但具体如何实现还需进一步论证，也未见相关参考文献。

(4) 具有前视目标探测能力：前视目标探测具有重要应用意义，但现有基于相控阵的前视探测方法不能解决目标多普勒参数在方位向的左右对称模糊问题，而且当面对强地杂波时需要进行杂波抑制

处理，但当存在距离模糊时目前的杂波补偿方法均会失效。利用频控阵波束的主瓣走动特性和距离依赖特性，有助于分离和抑制干扰，从而可在一定程度上抑制距离模糊杂波。

(5) 目标多维参数联合估计与定位：在相同阵元数目的情况下，当干扰与目标的角度比较靠近时，频控阵对干扰的抑制度比相控阵更高，甚至可以抑制具有与目标有相同角度方向的干扰，这在相控阵上是很难实现的。而且，频控阵应用于雷达目标参数估计时，能够估计出一些在相控阵雷达中无法估计的目标，如方位角相同而距离不同的目标。

(6) 自动波束扫描功能：频控阵发射波束具有距离-方位角自动扫描功能，而且弥补了相控阵不能进行距离维自动扫描的缺点。

(7) 定点发射波束形成功能：与相控阵只能实现“定向”发射波束形成不同，频控阵还能够通过干涉效应实现“定点”发射波束形成，可以应用于开发频控阵定点干扰新技术。需要说明的是这种现象其实是一种干涉效应，而不是发生能量会聚。

(8) 大范围群体目标欺骗干扰功能：利用频控阵波束的自动扫描功能、阵元频偏优化设计和距离-方位角耦合特性，频控阵干扰机能够对敌方探测雷达形成大范围群体目标欺骗干扰效果。

笔者在“频控阵雷达：概念、原理与应用”一文中<sup>[4]</sup>已经讨论了频控阵作发射机的新体制双站雷达、基于频控阵的认知雷达、基于频控阵的射频隐身雷达和基于频控阵的定向安全通信等应用前景。因此，这里只讨论几种新的频控阵雷达应用前景，主要包括雷达对抗和雷达-通信一体化。

##### 4.1 频控阵在雷达对抗中的应用前景

由于传统的噪声压制干扰技术对一些新体制雷达的干扰效果非常有限，我们可以利用频控阵阵列因子的距离依赖性、空变性和时变性特点，提出基于频控阵的新型干扰样式，有望产生比常规干扰技术更多的假目标，有效破坏雷达对目标的检测和跟



踪能力。同时, 频控阵干扰机也能够对雷达进行距离欺骗和速度欺骗, 产生大量假目标来对雷达进行有效干扰。与相控阵干扰机相比, 频控阵干扰机的优点可归纳为:

(1) 能够采用窄波束来提高干扰机的有效辐射功率, 能够实现对多个目标的干扰, 具有迅速、灵

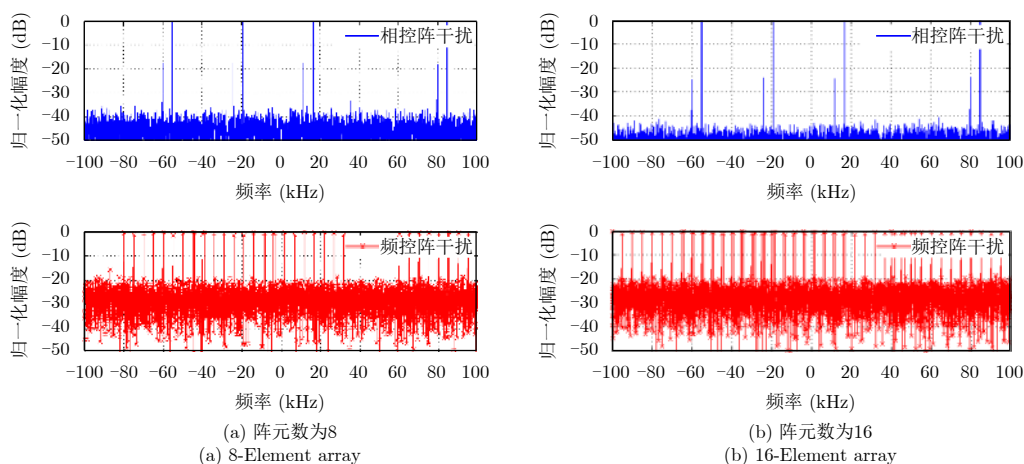


图 9 不同阵元数下相控阵与频控阵干扰多普勒域效果对比图

Fig. 9 Comparisons of phased-array jamming and FDA jamming methods in Doppler domain

(3) 频控阵干扰机可以在不改变频控阵雷达内部结构的情况下, 将其功能拓展, 完成方位和距离的搜索、跟踪、实施欺骗式干扰, 做到一机多用, 简化了干扰系统。

#### 4.2 频控阵在雷达-通信一体化中的应用前景

雷达-通信一体化是未来综合电子信息系统发展趋势<sup>[81]</sup>。从天线的角度来说, 阵列雷达具有高增益的特点, 利用有源阵列天线发射或接收通信信号, 不仅可以极大地提高通信系统的信息传输速率, 而且可以使通信系统与雷达共用收发通道, 提高了集成度, 降低了成本。同时, 阵列雷达具有方向性强、波束窄和旁瓣低等特点, 可提高反探测、抗干扰和保密性等能力。因此, 通过利用一体化设计所获得的共享资源和所具有的协调能力, 可根据战场态势和作战要求, 有选择地执行最佳的系统功能, 并对威胁目标作出最佳作战决策, 使雷达探测、定位、引导、识别更准确, 目的性更强, 系统反应更及时和迅速<sup>[82]</sup>。

虽然雷达-通信一体化技术已成为一个研究热点, 已有不少相关文献发表<sup>[83-88]</sup>, 但现有方法大都是基于相控阵天线的。由于频控阵具有相控阵的所有功能特性, 我们也可以将频控阵应用于雷达-通信一体化技术。如图10所示, 可以针对所要传递的通信信息编码选择合适的频偏作为频控阵雷达的频偏, 实现通信信息在雷达发射信号中的嵌入, 并在

活、准确的波束指向能力等。

(2) 由于频控阵在相邻阵元之间附加了频率增量, 利用这个微小的频偏还可以对雷达的多普勒频域检测形成有效的欺骗, 使得雷达在时域-多普勒频域同时受到干扰, 从而能够给雷达造成大范围群体目标欺骗干扰效果, 如图9所示。

接收机中采用双通道处理分别实现通信信息解码和雷达信号处理功能, 如图11所示。

而且, 基于频控阵的雷达-通信一体化技术还能保证信息传输的安全性<sup>[89,90]</sup>: Ding等人<sup>[91]</sup>将频控阵的频偏和OFDM的频偏联系起来, 在安全通信中取得比传统OFDM更好的安全效果, Hu等人<sup>[92]</sup>将随机频偏频控阵用于安全通信, Nusenu等人<sup>[93]</sup>将时间调制频控阵用于物理层安全通信中, Lin等人<sup>[94]</sup>提出基于频控阵波束形成的物理层安全通信方法。同时, 已有文献证明<sup>[80]</sup>: 与相控阵发射信号相比, 频控阵发射信号具有更平稳的回波平均功率, (如图12所示), 该特点对多径环境下的雷达-通信一体化应用非常有利。

#### 5 频控阵雷达技术中亟待解决的研究问题

虽然近年来频控阵雷达技术研究方面已经涌现出不少研究文献, 但由于这种新体制阵列与传统的相控阵在阵列特性和功能特性方面存在诸多不同, 目前频控阵雷达技术仍然存在大量亟待解决的研究问题:

(1) 频控阵雷达波束的时变性和其影响问题: 与相控阵雷达相比, 频控阵雷达的一个主要差别是其波束具有空变性和时变性。现有频控阵文献大多是通过固定时间变量来忽略时变性的影响问题, 这显然是不合理的, 需要研究频控阵波束的时变性影响及其抑制或利用方法。值得指出的是, 频控阵波



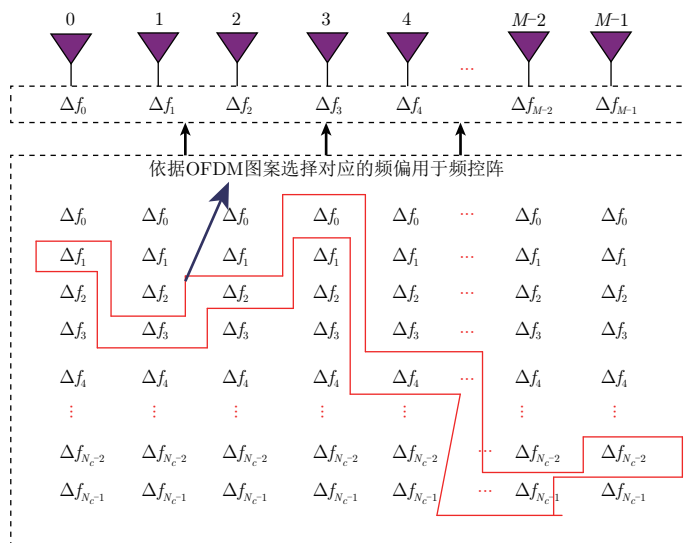


图 10 基于频控阵的雷达-通信一体化频偏设置方案示意图

Fig. 10 Illustration of frequency offsets for FDA-based radar-communications

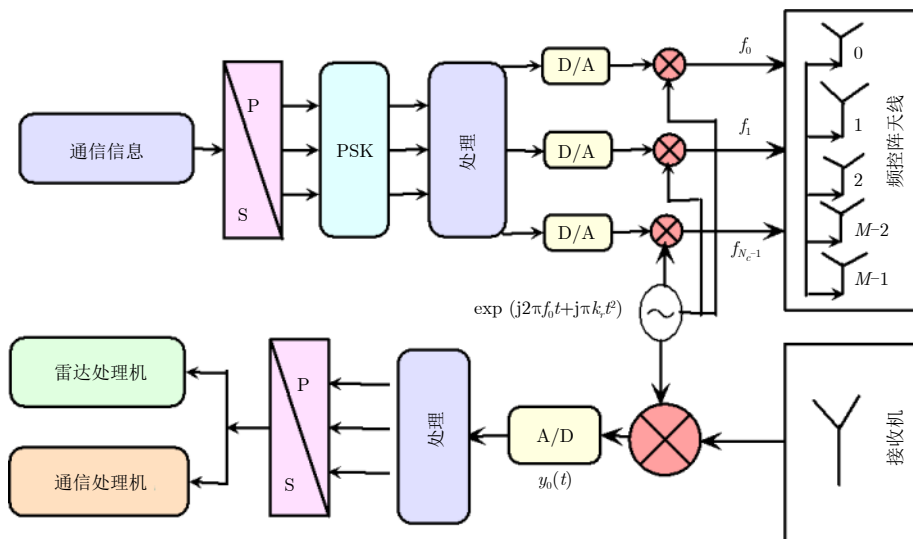


图 11 基于频控阵的雷达-通信一体化原理框图

Fig. 11 Illustration of FDA-based radar-communication scheme

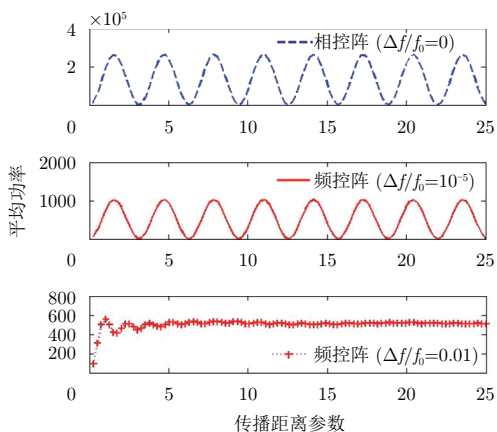


图 12 频控阵雷达与相控阵雷达发射信号的回波平均功率对比

Fig. 12 Comparisons of the average of returned signals between phased-array and FDA radars

束具有的时变性不一定是缺点，所以也有必要进一步研究如何利用这种时变性。

(2) 频控阵雷达接收机设计问题：由于频控阵最早是作为雷达发射阵列提出的，当前的研究主要集中在发射端，而对其接收端方面的研究还很少，所以非常有必要研究针对频控阵雷达发射信号的接收机优化设计方法，尤其是接收端的自适应最优阵列处理算法。

(3) 频控阵雷达发射参数的优化设计问题：虽然频控阵雷达发射参数优化设计是当前一个研究热点<sup>[95,96]</sup>，但是如何根据复杂变化环境优化出切实可行的频控阵雷达发射参数仍然需要进一步研究。同时，针对频控阵雷达的鲁棒性分析与处理方面也需要进一步研究。

(4) 频控阵MIMO(FDA-MIMO)雷达信号检测问题: 目前频控阵MIMO雷达被认为是频控阵雷达诸多技术中最为合理、功能最为完善和最具工程可实现性的。这是因为基本的频控阵雷达存在距离-方位角耦合问题, 在目标参数估计中容易带来估计模糊问题, 这种模糊问题可以通过引入MIMO技术来增加阵列自由度, 从而可以在一定程度上缓解目标参数估计中的模糊问题。但是, 针对频控阵MIMO雷达的信号检测、估计和跟踪方面都存在诸多研究问题。

(5) 频控阵雷达原理样机研制与试验验证: 当前频控阵雷达技术研究主要还处在理论研究、应用基础研究和概念系统设计阶段, 亟待开展频控阵雷达原理样机研制与关键技术试验验证方面的研究。

## 6 结束语

本文在作者“频控阵雷达: 概念、原理与应用”一文的基础上, 简要地介绍频控阵雷达的基本原理, 全面梳理近三年来国内外关于频控阵雷达技术及其应用方面的最新研究进展, 讨论了“频控阵雷达: 概念、原理与应用”一文中没有涉及的几种新的频控阵雷达技术应用前景, 主要包括雷达对抗和雷达-通信一体化应用, 并指出目前亟待解决的几个关键研究问题。虽然目前频控阵方面的理论研究面临诸多难题, 而其应用模式也还不够明朗, 但我们相信在频控阵雷达技术方面进行进一步的深入研究是值得的。

## 参 考 文 献

- [1] Antonik P, Wicks W C, Griffiths H D, *et al.* Frequency diverse array radars[C]. Proceedings of 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, 2006: 215–217.
- [2] Wicks M C and Antonik P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase[Z]. US, 7, 319, 427, 2008.
- [3] Antonik P. An investigation of a frequency diverse array[D]. [Ph.D. dissertation], University College London, 2009.
- [4] 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).
- [5] 霍凯, 赵晶晶. OFDM新体制雷达研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2776–2789. DOI: [10.11999/JEIT150335](https://doi.org/10.11999/JEIT150335).  
Huo Kai and Zhao Jingjing. The development and prospect of the new OFDM radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2776–2789. DOI: [10.11999/JEIT150335](https://doi.org/10.11999/JEIT150335).
- [6] Wang W Q. MIMO SAR imaging: Potential and challenges[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 27(8): 18–23. DOI: [10.1109/MAES.2013.6575407](https://doi.org/10.1109/MAES.2013.6575407).
- [7] 叶恺, 禹卫东, 王伟. 一种基于短偏移正交波形的MIMO SAR处理方案研究[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 376–387. DOI: [10.12000/JR17048](https://doi.org/10.12000/JR17048).  
Ye Kai, Yu Weidong, and Wang Wei. Investigation on processing scheme for MIMO SAR with STSO chirp waveforms[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 376–387. DOI: [10.12000/JR17048](https://doi.org/10.12000/JR17048).
- [8] 苏海, 张晓娟, 叶盛波, 等. 一种基于射频开关切换的伪随机编码超宽带多发多收雷达设计[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 43–54. DOI: [10.12000/JR16076](https://doi.org/10.12000/JR16076).  
Su Hai, Zhang Xiaojuan, Ye Shengbo, *et al.* Design of an ultra-wideband pseudo random coded MIMO radar based on radio frequency switches[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(1): 43–54. DOI: [10.12000/JR16076](https://doi.org/10.12000/JR16076).
- [9] 郭艺夺, 宫健, 黄大荣, 等. 机载MIMO雷达收发联合降维STAP算法统一理论框架[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 517–525. DOI: [10.12000/JR16108](https://doi.org/10.12000/JR16108).  
Guo Yiduo, Gong Jian, Huang Darong, *et al.* Unified theoretical frame of a joint transmitter-receiver reduced dimensional STAP method for an airborne MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 517–525. DOI: [10.12000/JR16108](https://doi.org/10.12000/JR16108).
- [10] 王珽, 赵拥军, 胡涛. 机载MIMO雷达空时自适应处理技术研究进展[J]. 雷达学报, 2015, 4(2): 136–148. DOI: [10.12000/JR14091](https://doi.org/10.12000/JR14091).  
Wang Ting, Zhao Yong-jun, and Hu Tao. Overview of space-time adaptive processing for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(2): 136–148. DOI: [10.12000/JR14091](https://doi.org/10.12000/JR14091).
- [11] So H C, Amin M G, Blunt S, *et al.* Introduction to the special issue on time/frequency modulated array signal processing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 225–227. DOI: [10.1109/JSTSP.2017.2652098](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2017.2652098).
- [12] Brady S. Frequency diverse array radar: Signal characterization and measurement accuracy[D]. [Master dissertation], Air Force Institute of Technology, 2010.
- [13] Sammartino P F, Baker C J, and Griffiths H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 201–222. DOI: [10.1109/TAES.2013.6404099](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404099).
- [14] Wang W Q. Frequency diverse array antenna: New

- opportunities[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(2): 145–152. DOI: [10.1109/MAP.2015.2414692](https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2414692).
- [15] Antonik P, Wicks M C, Griffiths H D, *et al.* Range-dependent beamforming using element level waveform diversity[C]. Proceedings of International Waveform Diversity & Design Conference, Las Vegas, 2006: 1–4.
- [16] Higgins T and Blunt S. Analysis of range-angle coupled beamforming with frequency-diverse chirps[C]. Proceedings of International Waveform Diversity and Design Conference, Orlando, FL, 2009: 140–144.
- [17] Wang W Q. Range-angle dependent transmit beampattern synthesis for linear frequency diverse arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(8): 4073–4081. DOI: [10.1109/TAP.2013.2260515](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2260515).
- [18] 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. DOI: [10.1109/TAP.2015.2423698](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2423698).
- [19] Wang W Q 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).
- [20] Xu J W, Zhu S Q, and 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. DOI: [10.1109/JSTSP.2015.2465353](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2015.2465353).
- [21] Aytun A. Frequency diverse array radar[D]. [Master dissertation], Naval Postgraduate School, 2010.
- [22] Brady S. Frequency diverse array radar: Signal Characterization and measurement accuracy[D]. [Master dissertation], Air Force Institute of Technology, 2010.
- [23] Eker T. A conceptual evaluation of frequency diverse arrays and novel utilization of LFM CW[D]. [Ph.D. dissertation], Middle East Technical University, 2011.
- [24] Higgins T. Waveform diversity and range-coupled adaptive radar signal processing[D]. [Ph.D. dissertation], University of Kansas, 2011.
- [25] Huang J. Frequency diversity array: Theory and design[D]. [Ph.D. dissertation], University College London, 2010.
- [26] Farooq J. Frequency diversity for improving synthetic aperture radar imaging[D]. [Master dissertation], Air University Air Force Institute of Technology, 2009.
- [27] Wang W Q. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1001–1012.
- [28] Cetintepe C. Analysis of frequency diverse arrays for radar and communication applications[D]. [Ph.D. dissertation], Middle East Technical University, 2015.
- [29] 许京伟. 频率分集阵列雷达运动目标检测方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2015.  
Xu Jing-wei. Study on moving target detection with frequency diverse array radar[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2015.
- [30] 高宽栋. 频控阵雷达阵列优化设计及其目标参数估计方法研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2016.  
Gao Kuan-dong. Research of optimal array design and parameter estimation on frequency diverse array[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [31] Jones A M. Frequency diverse array receiver architectures[D]. [Master dissertation], Wright State University, 2011.
- [32] Khan W, Qureshi I M, Basit A, *et al.* Range-bins-based MIMO frequency diverse array radar with logarithmic frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 885–888. DOI: [10.1109/LAWP.2015.2478964](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2478964).
- [33] Gao K D, Wang W Q, Cai J Y, *et al.* Decoupled frequency diverse array range-angle-dependent beampattern synthesis using non-linearly increasing frequency offsets[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(8): 880–884. DOI: [10.1049/iet-map.2015.0658](https://doi.org/10.1049/iet-map.2015.0658).
- [34] Liu Y M, 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. DOI: [10.1109/JSTSP.2016.2627183](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2627183).
- [35] Wang W Q, So H C, and Farina A. An overview on time/frequency modulated array processing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 228–246. DOI: [10.1109/JSTSP.2016.2627182](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2627182).
- [36] Shao H Z, Dai J, Xiong J, *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).
- [37] Gao K D, Wang W Q, Chen H, *et al.* Transmit beamspace design for multi-carrier frequency diverse array sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(14): 5709–5714. DOI: [10.1109/JSEN.2016.2573379](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2573379).
- [38] Xiong J, Wang W Q, Shao H Z, *et al.* Frequency diverse array transmit beampattern optimization with genetic algorithm[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 469–472. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2584078](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2584078).
- [39] Khan W and Qureshi I M. Frequency diverse array radar with time-dependent frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 758–761. DOI:



- [10.1109/LAWP.2014.2315215](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2315215).
- [40] Yao A M, Wu W, and Fang D G. Frequency diverse array antenna using time-modulated optimized frequency offset to obtain time-invariant spatial fine focusing beampattern[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(10): 4434–4446. DOI: [10.1109/TAP.2016.2594075](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2594075).
- [41] Yao A M, Wu W, and 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. DOI: [10.1109/TAP.2016.2633902](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2633902).
- [42] Yao A M, Rocca P, Wu W, *et al.* Synthesis of time-modulated frequency diverse arrays for short-range multifocusing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 282–294. DOI: [10.1109/JSTSP.2016.2615267](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2615267).
- [43] Cheng Q, Zhu J, Xie T, *et al.* Time-invariant angle-range dependent directional modulation based on time-modulated frequency diverse arrays[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 26279–26290. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2772246](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2772246).
- [44] Yang Y Q, Wang H, Wang H Q, *et al.* Optimization of sparse frequency diverse array with time-invariant spatial-focusing beampattern[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 351–354. DOI: [10.1109/LAWP.2018.2789979](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2789979).
- [45] Chen H, Shao H Z, and Wang W Q. Joint sparsity-based range-angle-dependent beampattern synthesis for frequency diverse array[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 15152–15161. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2731973](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2731973).
- [46] Chen B X, Chen X L, Huang Y, *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).
- [47] Li Q, Huang L, Zhang P C, *et al.* Beampattern synthesis for frequency diverse array via reweighted iterative phase compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 467–475. DOI: [10.1109/TAES.2017.2735638](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2735638).
- [48] Fartookzadeh M and Armaki S H M. Synthesis of serial-fed frequency diverse arrays with periodic triangular frequency-modulated continuous waveform[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(2): 263–266. DOI: [10.1109/LAWP.2017.2785438](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2785438).
- [49] Wang Y X, Wang G C, and Li W. Transmit beampattern design in range and angle domains for MIMO frequency diverse array radar[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1003–1006. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2616193](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2616193).
- [50] Xu Y H, Shi X M, Li W T, *et al.* Flat-top beampattern synthesis in range and angle domains for frequency diverse array via second-order cone programming[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1479–1482. DOI: [10.1109/LAWP.2015.2513758](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2513758).
- [51] Sammartino P F, Baker C J, and Griffiths H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 201–222. DOI: [10.1109/TAES.2013.6404099](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404099).
- [52] Wang W Q and Shao H Z. Range-angle localization of targets by a double-pulse frequency diverse array radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 8(1): 106–114. DOI: [10.1109/JSTSP.2013.2285528](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2285528).
- [53] Wang W Q. Subarray-based frequency diverse array radar for target range-angle estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 3057–3067. DOI: [10.1109/TAES.2014.120804](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.120804).
- [54] Wang W Q, Dai M M, and Zheng Z. FDA radar ambiguity function characteristics analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018. DOI: [10.1109/TAES.2017.2785598](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2785598).
- [55] Wang W Q and Zhu C L. Nested array receiver with time-delayers for joint target range and angle estimation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(8): 1384–1393. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0450](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0450).
- [56] Li J J, Li H B, and Ouyang S. Identifying unambiguous frequency pattern for target localisation using frequency diverse array[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(19): 1331–1333. DOI: [10.1049/el.2017.2355](https://doi.org/10.1049/el.2017.2355).
- [57] Qin S, Zhang Y D, Amin M G, *et al.* Frequency diverse coprime arrays with coprime frequency offsets for multitarget localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 321–335. DOI: [10.1109/JSTSP.2016.2627184](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2627184).
- [58] 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. DOI: [10.1109/TSP.2015.2422680](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2422680).
- [59] Xu J W, Liao G S, Zhang Y H, *et al.* An adaptive range-angle-Doppler processing approach for FDA-MIMO radar using three-dimensional localization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(2): 309–320. DOI: [10.1109/JSTSP.2016.2615269](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2615269).
- [60] Gao K D, Wang W Q, and Cai J Y. Frequency diverse array and MIMO hybrid radar transmitter design via Cramér-Rao lower bound minimisation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(9): 1660–1670. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0644](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0644).
- [61] Xiong J, Wang W Q, and Gao K D. 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).
- [62] Cui C, Xu J, Gui R H, *et al.* Search-free DOD, DOA and range estimation for bistatic FDA-MIMO radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 15431–15445. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2816780](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2816780).
- [63] Li X X, Wang D W, Ma X Y, *et al.* FDS-MIMO radar low-altitude beam coverage performance analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(9): 2494–2506. DOI: [10.1109/TSP.2018.2815011](https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2815011).
- [64] Li X X, Wang D W, Wang W Q, *et al.* Range-angle localization of targets with planar frequency diverse subaperturing MIMO radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12505–12517. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2810139](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2810139).
- [65] Gong P C, Wang W Q, Li F C, *et al.* Sparsity-aware transmit beamspace design for FDA-MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2018, 144: 99–103. DOI: [10.1016/j.sigpro.2017.10.008](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.10.008).
- [66] Gui R H, Wang W Q, Cui C, *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. DOI: [10.1109/TSP.2017.2764860](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2764860).
- [67] Xu J W, Liao G S, Zhu S Q, *et al.* Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9–17. DOI: [10.1016/j.sigpro.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014).
- [68] Xu J W, Zhu S Q, and Liao G S. Space-time-range adaptive processing for airborne radar systems[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(3): 1602–1610. DOI: [10.1109/JSEN.2014.2364594](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2364594).
- [69] Xu J W, Liao G S, 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).
- [70] Xu J W, Liao G S, Huang L, *et al.* Robust adaptive beamforming for fast-moving target detection with FDA-STAP radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(4): 973–984. DOI: [10.1109/TSP.2016.2628340](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2628340).
- [71] Lin C C, Huang P M, Wang W W, *et al.* Unambiguous signal reconstruction approach for SAR imaging using frequency diverse array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(9): 1628–1632. DOI: [10.1109/LGRS.2017.2727512](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2727512).
- [72] Wang C H, Xu J W, Liao G S, *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).
- [73] Basit A, Qureshi I M, Khan W, *et al.* Range-angle-dependent beamforming for cognitive antenna array radar with frequency diversity[J]. *Cognitive Computation*, 2016, 8(2): 204–216. DOI: [10.1007/s12559-015-9348-6](https://doi.org/10.1007/s12559-015-9348-6).
- [74] Basit A, Khan W, Khan S, *et al.* Development of frequency diverse array radar technology: A review[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(2): 165–175. DOI: [10.1049/iet-rsn.2017.0207](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0207).
- [75] Wang W Q. Cognitive frequency diverse array radar with situational awareness[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 359–369. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0211](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0211).
- [76] Wang W Q. Moving-target tracking by cognitive RF stealth radar using frequency diverse array antenna[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 3764–3773. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2527057](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2527057).
- [77] Xiong J, Wang W Q, Cui C, *et al.* Cognitive FDA-MIMO radar for LPI transmit beamforming[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(10): 1574–1580. DOI: [10.1049/iet-rsn.2016.0551](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0551).
- [78] Gui R H, Wang W Q, Pan Y, *et al.* Cognitive target tracking via angle-range-Doppler estimation with transmit subaperturing FDA radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2018, 12(1): 76–89. DOI: [10.1109/JSTSP.2018.2793761](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2793761).
- [79] Eker T, Demir S, and Hizal A. Exploitation of Linear Frequency Modulated Continuous Waveform (LFMCW) for Frequency Diverse Arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(7): 3546–3553. DOI: [10.1109/TAP.2013.2258393](https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2258393).
- [80] Cetintepe C and Demir S. Multipath characteristics of frequency diverse arrays over a ground plane[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3567–3574. DOI: [10.1109/TAP.2014.2316292](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2316292).
- [81] Sturm C and Wiesbeck W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259. DOI: [10.1109/JPROC.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2131110).
- [82] 刘志鹏. 雷达通信一体化波形研究[D]. [博士学位], 北京理工大学, 2015.
- Liu Zhi-peng. Waveform research on integration of radar and communication[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2015.
- [83] Labib M, Marojevic V, Martone A F, *et al.* Coexistence between communications and radar systems: A survey[J]. *URSI Radio Science Bulletin*, 2017, 2017(362): 74–82.
- [84] Zheng L, Lops M, Wang X D, *et al.* Joint design of overlaid communication systems and pulsed radars[J]. *IEEE*

- Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(1): 139–154. DOI: [10.1109/TSP.2017.2755603](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2755603).
- [85] Shi C G, Wang F, Sellathurai M, *et al.*. Power minimization-based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(5): 1316–1330. DOI: [10.1109/TSP.2017.2770086](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2770086).
- [86] Li M J, Wang W Q, and Zheng Z. Communication-embedded OFDM chirp waveform for delay-Doppler radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 353–360. DOI: [10.1049/iet-rsn.2017.0369](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0369).
- [87] Li B and Petropulu A P. Joint transmit designs for coexistence of MIMO wireless communications and sparse sensing radars in clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(6): 2846–2864. DOI: [10.1109/TAES.2017.2717518](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2717518).
- [88] Chiriyath A R, Paul B, and Bliss D W. Radar-communications convergence: Coexistence, cooperation, and co-design[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2017, 3(1): 1–12. DOI: [10.1109/TCCN.2017.2666266](https://doi.org/10.1109/TCCN.2017.2666266).
- [89] Wang W Q. DM using FDA antenna for secure transmission[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(3): 336–345. DOI: [10.1049/iet-map.2016.0303](https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0303).
- [90] Wang W Q. Potential transmit beamforming schemes for active LPI radars[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, 32(5): 46–52. DOI: [10.1109/MAES.2017.150259](https://doi.org/10.1109/MAES.2017.150259).
- [91] Ding Y, Zhang J, and Fusco V. Frequency diverse array OFDM transmitter for secure wireless communication[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(17): 1374–1376. DOI: [10.1049/el.2015.1491](https://doi.org/10.1049/el.2015.1491).
- [92] Hu J S, Yan S H, 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. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2653182](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2653182).
- [93] Nusenu S Y, Wang W Q, and Xiong J. Time-modulated FDA for physical-layer security[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(9): 1274–1279. DOI: [10.1049/iet-map.2016.0930](https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0930).
- [94] Lin J R, Li Q, Yang J T, *et al.*. Physical-layer security for proximal legitimate user and eavesdropper: A frequency diverse array beamforming approach[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2018, 13(3): 671–684. DOI: [10.1109/TIFS.2017.2765500](https://doi.org/10.1109/TIFS.2017.2765500).
- [95] Wang Y B, Wang W Q, Chen H, *et al.*. Optimal frequency diverse subarray design with Cramer-Rao lower bound minimization[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1188–1191. DOI: [10.1109/LAWP.2015.2396951](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2396951).
- [96] 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).

### 作者简介



王文钦，男，教授，博士生导师，主要研究方向为阵列处理及其在雷达、通信和电子对抗中的应用研究。

E-mail: wqwang@uestc.edu.cn



郑植，男，副研究员，硕士生导师，主要研究方向为阵列信号处理。



陈慧，女，副教授，硕士生导师，主要研究方向为阵列信号处理。



张顺生，男，副研究员，硕士生导师，主要研究方向为雷达信号处理。