频率分集阵雷达技术探讨

许京伟*[①] 朱圣棋[①] 廖桂生[①] 张玉洪[②]

[①](西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

[②](西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘 要：频率分集阵(Frequency Diverse Array, FDA)雷达不同天线单元的发射载频存在微小的差异，从而带来了发射方向图距离角度时间依赖的特性，这一特性提供了FDA雷达新的信息和信号处理灵活度，也带了新的技术问题。该文综述了FDA天线技术及雷达应用的相关研究进展，并重点从雷达系统理论与工程应用的角度，着重分析了相干FDA雷达和正交FDA雷达两种体制的技术特点，指出FDA雷达在抗干扰、抗模糊中的应用优势，梳理了FDA雷达技术的难点和研究方向。

关键词：频率分集阵；MIMO雷达；天线方向图；波形分集；抗干扰

中图分类号：TN957 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2018)02-0167-16

DOI: 10.12000/JR18023

引用格式：许京伟, 朱圣棋, 廖桂生, 等. 频率分集阵雷达技术探讨[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 167–182. DOI: 10.12000/JR18023.

Reference format: 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.

An Overview of Frequency Diverse Array Radar Technology

Xu Jingwei[①] Zhu Shengqi[①] Liao Guisheng[①] Zhang Yuhong[②]

[①](*National Laboratory of Radar Signal Processing*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

[②](*School of Electronic Engineering*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

Abstract: The carrier frequencies of array elements in a Frequency Diverse Array (FDA) radar are slightly distinguished, leading to a range-angle-time-dependent transmit beampattern. Thus, an FDA radar carries additional information in a certain range and provides more flexibility in signal processing and new technical issues. FDA is covered by scope of the general waveform diversity concept. This paper overviews the state-of-the-art FDA technology and its radar applications. From the viewpoint of the general radar system theory, we mainly introduce the coherent FDA and orthogonal FDA frameworks. The orthogonal FDA is also referred to as Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar using FDA or FDA-MIMO radar. Key applications in anti-jamming and issues related with range ambiguity are addressed. We also outline the challenges in FDA radar applications and several interesting research topics.

Key words: Frequency Diverse Array (FDA); Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar; Antenna beampattern; Waveform diversity; Anti-jamming

1 引言

频率分集阵(Frequency Diverse Array, FDA)的概念是由美国空军实验室高级研究员Paul Antonik等人提出的[1–6]，概念上是在相控阵的天线单元之间引入发射频率差异，例如在1维等距线阵(Uniform Linear Array, ULA)的发射单元之间引入均匀步进的发射频率，且频率步进量远小于天线的参考工作载频。实际上，Paul Antonik等人只是提出FDA的基本概念并初步分析和验证了其发射方向图的基本特性，并没有继续深入探究FDA在电子与信息领域的应用，尽管他们在文献[3]中乐观地指出其在雷

收稿日期：2018-03-20；改回日期：2018-04-08；网络出版：2018-04-20

*通信作者： 许京伟 xujingwei1987@163.com

基金项目：国家自然科学基金(61601339)、中国博士后科学基金(2016M590925, 2017T100728)、香江学者计划(XJ2017027)、航空科学基金(20160181001)、上海航天科技创新基金(SAST2017-070)和陕西省博士后科学基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601339), The China Postdoctoral Science Foundation (2016M590925, 2017T100728), The Hong Kong Scholars Program (XJ2017027), The Aviation Science Foundation (20160181001), The Innovation Foundation of Shanghai Academy of Spaceflight Technology (SAST2017-070), The Shannxi Postdocatoral Science Foundation

达中具有重要的应用前景。的确如此，雷达的更新换代通常都是从系统可控自由度的增加开始的，例如脉冲维自由度、极化维自由度、阵元维自由度等等，新的可控自由度往往意味着雷达系统的升级，同时，雷达性能的发挥也必然依赖于先进的信号处理技术[7,8]。

实际上，FDA的概念是在美国空军实验室、空间与导弹防御司令部以及美国海军实验室共同主持的波形分集技术研究计划的背景下提出的，来自多个国家的跟踪美国波形分集技术研究计划的相关科研人员，在FDA概念提出后相继开展了对其相关特性的分析与探索研究[9–34]。从公开的研究文献来看，这一阶段所主要关心的问题依然是FDA距离-角度-时间依赖的方向图。由此也可以看出，尽管从相控阵到FDA的变化看上去并不大，但其引起的天线辐射特性的变化是本质的，吸引了诸多学者对其从多个角度进行分析与解释。同时也说明，清楚地揭示FDA天线方向图的基本特性，对于开展FDA应用研究至关重要。这一阶段中也有部分研究工作者开始关注FDA的应用，但仍基本上围绕特性分析为主。这里我们强调一点：相控阵的远场辐射方向图仅仅是角度的函数，可以在远场测得稳定的天线方向图；然而FDA方向图的测量却并不容易，正是因为其发射方向图的角度-距离-时间依赖性，现有文献中给出的FDA发射方向图通常是某一瞬时时刻所对应的天线远场区域辐射能量分布(实际中难以测量)或者是某一远场球面对应的天线辐射电场能量随时间的变化(可以测量，测量过程较相控阵更为复杂)。

随着FDA研究的深入，人们一方面期望利用其新特性来提高系统性能甚至解决以前难以解决的问题[35–62]；另一方面也开始注意到FDA带来新信息的同时也带来了方向图时变(非稳态)的问题，并探索多种解决的办法[45–53]；同时，还展开了FDA的应用研究和拓展。本文主要关注FDA技术在雷达系统中的应用研究[31,63–83]。首先，针对FDA方向图的距离-角度2维依赖特性，诸多文献探索了FDA距离角度2维波束形成方法以及目标距离-角度联合参数估计方法。从一般意义上讲，既然FDA导向矢量包含目标的距离信息，就可以采用适当的方法实现距离角度2维波束形成以及目标距离-角度参数联合估计。值得注意的，FDA的距离信息仅仅包含在发射导向矢量中，若要获取距离信息必须获得分离的发射波形，并非是直接设计发射方向图就可实现的。其次，FDA的发射方向图是时变的(非稳态的)，其发射方向图的测量难度大。实际上，电磁波在空间中传播遵循麦克斯韦方程，在真空或均匀介质中，相对于天线相位中心(辐射源)的任意空间射线方向上，不同距离的远场位置处所历经的电磁波相位历程是完全相同的，只是存在时间上的先后关系，当然电场强度随距离平方衰减。本文作者认为，发射方向图研究的意义在于指导FDA天线的设计和测量，单纯考虑从发射方向图的视角来解决其方向图的时变问题意义不大，应当结合工程应用的具体问题，从系统整体出发，在保持FDA所提供的距离信息的同时，实现雷达系统性能的提升。

本文在综述现有FDA研究的基础上，分析了现有成果的创新性贡献，重点从雷达系统应用的角度，分析了FDA雷达的优势和其潜在的应用，同时指出了需要进一步研究和解决的问题。文章的逻辑结构为：第2部分介绍FDA的基本概念，对FDA发射方向图的物理意义进行了阐述；第3部分强调了脉冲体制FDA的发射方向图，着重描述FDA体制电磁波的传播特性；第4部分和第5部分，分别给出了相干FDA雷达和正交FDA雷达两种重要体制及其相关技术特点。总而言之，FDA是波形分集概念的一种特殊形式，其理论和应用尚需要进一步的研究。

2 FDA的基本原理与概念

不同于相控阵各个天线单元发射的电磁波载频是一致的，FDA在各阵元发射频率上引入微小的频率变化，通常是有规律的变化，因此不同天线单元工作的中心频率是不同的。不失一般性，考虑以M个阵元组成的ULA为例，第m天线单元的发射频率可表达为：

$$f_m = f_0 + (m-1)\Delta f \tag{1}$$

其中，f_0为参考载频，Δf为频率步进量。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。可见，FDA相对于常规相控阵的改变仅仅在载波频率上。然而这个改变在其发射方向图中引入了距离-角度-时间的3维依赖性，与传统相控阵形成了很大的差异。在FDA概念提出后的一段时期内，人们所关注的主要是单频连续波体制，即不同天线单元辐射频率步进的单频信号。在空间远场距离R，角度θ处，电磁波空间合成所得的电场分布可以表示为：

$$F^{\mathrm{FDA}}(t,R,\theta) = \sum_{m=1}^{M}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_m\left(t-\frac{R-d(m-1)\sin(\theta)}{c}\right)\right\} \tag{2}$$

为了便于比较，给出相控阵的远场电场分布

$$F^{\mathrm{PA}}(t,R,\theta)=\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_0\left(t-\frac{R}{c}\right)\right\}\cdot\sum_{m=1}^{M}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{f_0 d(m-1)\sin(\theta)}{c}\right\}\tag{3}$$

由此可见，FDA天线的远场辐射的电场分布与传统相控阵的电场分布是不同的：(1)相控阵体制下，天线发射方向图(式(3)中等号右边的第2部分)仅仅是角度的函数，是稳定的；(2)FDA体制下，电场分布中的时间、距离和角度因素不可分离，因此其发射方向图是距离-角度-时间3维依赖的。为便于解释，我们进一步将FDA的电场分布表达为：

$$\begin{aligned}F^{\mathrm{FDA}}(t,R,\theta)&=\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_0\left(t-\frac{R}{c}\right)\right\}\cdot\exp\left\{\mathrm{j}\pi(M-1)\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right\}\\&\cdot\frac{\sin\left(\pi M\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}\end{aligned}\tag{4}$$

式(4)等号右侧的第1个指数项与相控阵的相同，表达电磁波的传播过程。其余的部分共同反映FDA发射方向图的特性，是随时间慢变的，可表示为：

$$\begin{aligned}F(t,R,\theta)&=\exp\left\{\mathrm{j}\pi(M-1)\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right.\\&\cdot\frac{\sin\left(\pi M\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}\end{aligned}\tag{5}$$

式(5)中省略了方向图的上标“FDA”，为方便起见，下文中均省略该上标。注意到式(4)或式(5)的推导过程中省略了相位中关于阵元序号m的2次项，即$2\pi\Delta fd(m\text{–}1)^2\sin(\theta)/c$，通常情况下，当频率步进量相对于工作载频和基带信号带宽远小时，忽略关于阵元数m的2次项是合理的。实际上，当该2次相位$2\pi\Delta fd(m\text{–}1)^2\sin(\theta)/c$的最大值满足如下条件时

$$2\pi\Delta f\frac{d}{c}(M-1)^2=2\pi\frac{\Delta f}{f_0}(M-1)^2\le\frac{\pi}{8}\tag{6}$$

忽略2次项对方向图的影响很小。但如果阵元间距大(如稀布阵列)、阵元数多或者频率步进量大，忽略该2次相位项可引起空间散焦。式(6)可进一步近似表达为：

$$\frac{A_{\mathrm{s}}(M-1)}{R_{\mathrm{u}}}\le\frac{1}{8}\tag{7}$$

其中，$A_{\mathrm{s}}=d(M\text{–}1)$为阵列的孔径，$R_{\mathrm{u}}=c/\Delta f$为FDA方向图的距离周期(单程)。换句话说，当阵列孔径与距离周期可比拟时，需要考虑2次相位项的问题。关于2次相位问题的其他分析和讨论，可参阅文献[77,80]。综上所述，FDA的基本特征是：发射方向图的幅度和相位响应均是距离-角度-时间3维依赖的函数，角度周期(或栅瓣)与阵元间距和参考载频有关，距离与时间是共生共存的一对变量，距离周期(单程)为$R_{\mathrm{u}}=c/\Delta f$，时间周期为$T_{\mathrm{u}}=1/\Delta f$。下面进一步给出关于连续波体制FDA天线方向图特性的分析：

● 固定空间距离R，可以得到方向图随时间和角度的函数关系，其物理意义是指，在空间距离为R的球面上，不同角度不同时刻的电场分布。换句话说，就是电磁波穿越空间球面对应的电场幅相响应。这也是通常情况下得到的FDA天线的测量电场方向图，比相控阵天线方向图的测量更为复杂。相控阵的方向图不依赖于距离，当然也与时间无关。

● 固定时间t，可以得到方向图随距离和角度的函数关系，其物理意义是在某一瞬时时刻，空间不同距离和角度位置的电场强度，其测量难度大。随着时间t的改变，电场的空间分布也相应地改变，如同海面的波浪一样。

● 固定角度θ，可以得到方向图随距离和时间的函数关系，其物理含义是电磁波在该方向上的电场分布。这一函数对于雷达回波信号处理至关重要。众所周知，相控阵的方向图是角度的函数，且不同方向对应的信号包络的相位响应是完全相同的，即具有各向同性的特点，因此，空间波束形成和快时间匹配滤波是独立可分离的。而FDA体制下，在任意空间方向上，其幅度响应和相位响应均是变化的，并且不同方向上的幅度响应和相位响应也不同，具有各向异性的特性，因此，空间波束形成和快时间匹配滤波往往是耦合在一起不可分离的。

图1给出了距离R=3 km的空间球面上，FDA天线辐射电场强度随角度和时间的变化关系，也就是电磁波在距离R=3 km的球面上的电场强度的变化，换句话说，是电磁波穿越R=3 km的球面处的电场强度随时间的变化。由上述方向图的变化

可知，在远场空间任意一点处，随着时间的变化，都会周期性地随着快时间历经方向图的主瓣和旁瓣。图2给出了不同瞬时时刻，FDA天线辐射电场强度在距离和角度维的分布。仿真中的角度范围为–90°～90°，距离范围为1.5～4.5 km。由仿真结果可以直观地看出FDA天线发射方向图的时变效应。图3给出了FDA不同角度方向某一距离点对应的电场强度随时间的变化。仿真中仅给出了一个时间周期内的电场强度，并且选取的距离为R=3 km，发射的基带波形为线性调频信号。注意，满足角度相同的条件下，任意距离对应的时域响应均相同。

连续波体制下，FDA天线的发射方向图可以理解为主瓣在空间角度维随时间自动扫描，因此，各个空间方向的能量是相同的，类似于多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术。由于存在这种自动扫描特性，其平均功率相比于相控阵损失M倍，等效的天线发射增益损失M倍。需要说明的是，当感兴趣的观测空域很大时，如在雷达搜索模式下，FDA通过时间的积累是可以获得与相控阵相同的处理增益的。在近几年广受关注的民用安防领域，雷达需要完成近程区域的空域警戒任务，传统机械扫描甚至电子扫描体制均存在时间资源紧张的问题，采用FDA是一种有效的解决方案，但需要考虑降低成本。表1中给出了相控阵、经典MIMO和FDA 3种体制下，与天线发射方向图相关的比较。由比较结果可见，FDA作为一种新的阵列体制，其与经典MIMO有更多的相似性。

3 脉冲波形体制FDA技术

通常在雷达应用中，更多地采用脉冲信号作为发射波形。此时，相应第m个天线单元的发射信号形式可表示为：

$$s_m(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_\mathrm{p}}\right)\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_m t\right\} \tag{8}$$

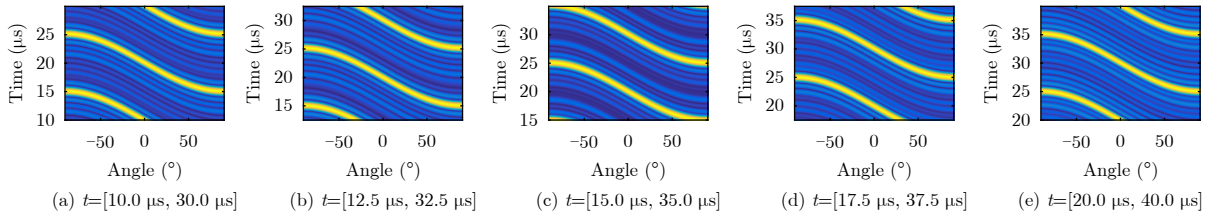


图 1 电场强度随角度和时间的变化关系，R=3 km

Fig. 1 Electric field intensity with respect to angle and time, R=3 km

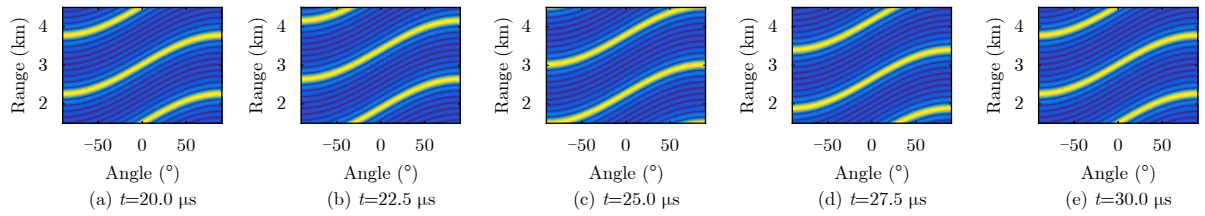


图 2 电场强度随距离和角度的变化关系，R=[1.5 km, 4.5 km]

Fig. 2 Electric field intensity with respect to range and angle, R=[1.5 km, 4.5 km]

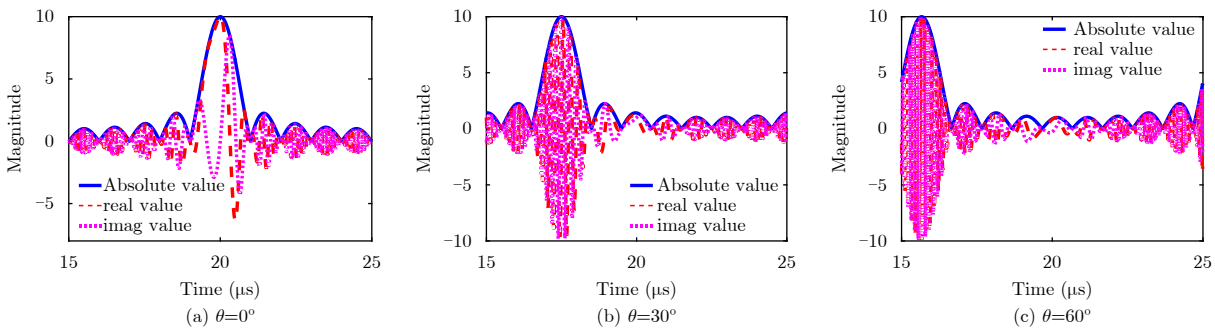


图 3 不同角度方向对应的电场强度，R=3 km

Fig. 3 Electric field intensity in different angles/directions, R=3 km

表 1 3种体制发射方向图相关特性比较

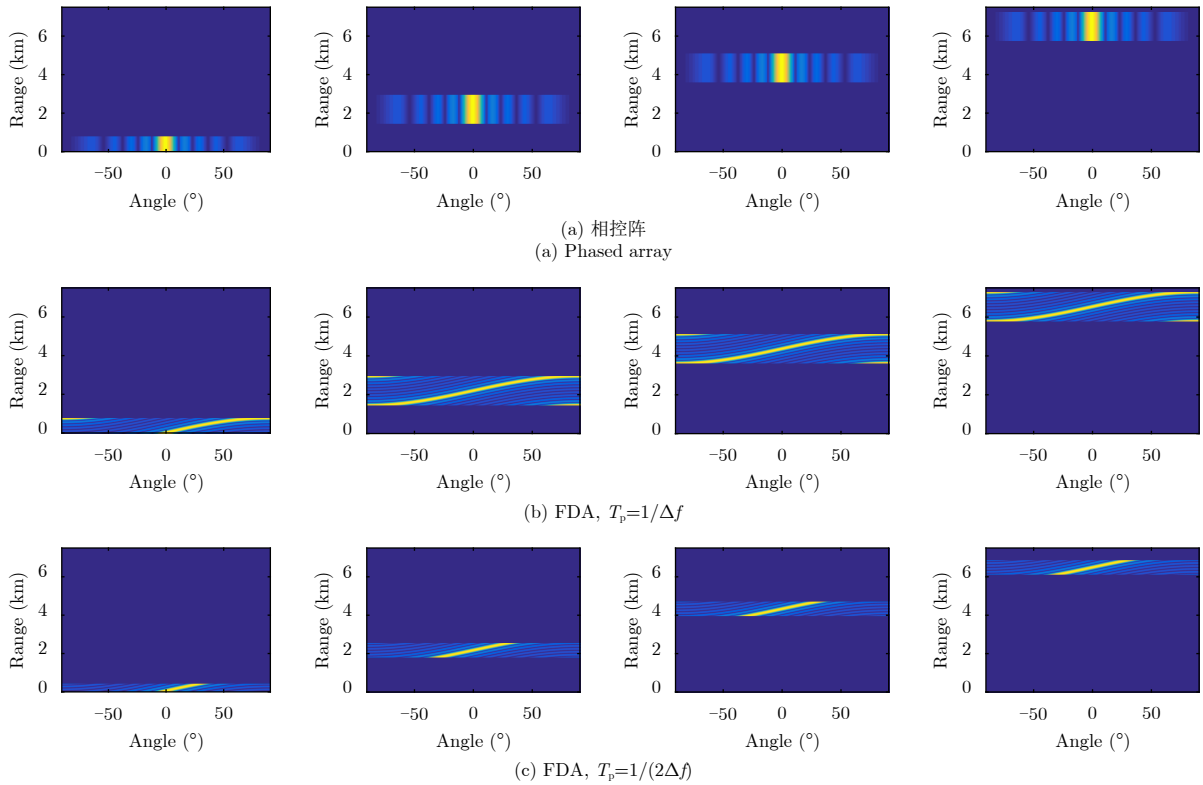
Tab. 1　Comparion of characters related to transmit beampatterns of phased array, MIMO, and FDA

阵列体制	不同方向的时域响应	方向图的距离依赖性	发射方向图主瓣	天线发射增益
相控阵	各向同性	距离无关	稳定	M^2
经典MIMO	各向异性	随距离变化，无规律	无	M
FDA	各向异性	随距离变化，有规律	自动扫描	M

其中，rect(·)是矩形脉冲包络，其对应的发射方向图可表达为：

$$\begin{aligned}F(t,R,\theta)&=\mathrm{rect}\left(\frac{t-R/c}{T_\mathrm{p}}\right)\\&\cdot\exp\left\{\mathrm{j}\pi(M-1)\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right\}\\&\cdot\frac{\sin\left(\pi M\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{R}{c}\right)+\frac{f_0 d\sin(\theta)}{c}\right)\right)}\end{aligned}\tag{9}$$

其中，$|t-R/c|<T_\mathrm{p}/2$。严格地说，发射方向图不应该包含式(9)中的矩形脉冲包络部分，这样处理只是为了便于描述脉冲信号体制下的电磁波传播过程。实际上，脉冲体制和连续波体制的FDA的发射方向图没有差异，上节所述连续波体制下的方向图特性同样适用于脉冲体制下的FDA天线。前文中提到，给定某一瞬时时刻，可以得到空间不同距离和角度位置的电场分布。随着时间t的变化，该电场分布也会像波浪一样随之发生变化，这一变化直观地反映了FDA天线电磁波的传播特性。为演示这一电磁波的传播过程，图4给出了脉冲体制下在不同瞬间的相控阵和FDA在距离-角度上的辐射电场分布情况。图4(a)为相控阵的辐射电场分布图；图4(b)为FDA在满足$T_\mathrm{p}=1/\Delta f$条件下的辐射电场分布图，图4(c)为FDA在满足$T_\mathrm{p}=1/(2\Delta f)$条件下的辐射电场分布图。可以看到，电磁波随时间在空间中传播，有效电场部分所对应的距离维宽度由脉冲持续时间所决定。在距离-角度上电场分布受发射方向图调制，在不同瞬时时刻，辐射的电磁波向前传播，到达不同的位置。此外，FDA发射方向图主瓣覆盖空间角度的范围与系统参数有关，当满足$T_\mathrm{p}<1/\Delta f$时，发射方向图主瓣只能覆盖有限的空间角度。因此，通过控制雷达参数可以控制



(a) 相控阵
(a) Phased array

(b) FDA, $T_\mathrm{p}=1/\Delta f$

(c) FDA, $T_\mathrm{p}=1/(2\Delta f)$

图 4 相控阵和FDA的辐射电场能量分布图的传播示意图

Fig. 4　Radiated power distribution and propagation of electric field

FDA发射方向图覆盖的空间区域。同时需要说明的是，对于相同角度不同距离的空间位置，尽管电磁波穿越的时间有先后之分，但电磁波激励产生的相位响应是完全一致的，与阵列的体制无关。

实际上，无论是连续波体制还是脉冲体制，FDA发射方向图的研究对于指导天线系统的设计和天线测量具有重要意义，通过测量天线发射方向图可以反推天线系统的指标满足情况。例如，各发射天线单元的频率偏差将对发射方向图产生影响，并且FDA的频率步进量较小，因此也对发射频率精度提出了较高要求，通过测量天线发射方向图可以反推频率步进量的设计是否满足要求。此外，FDA的发射通道是独立的，因此通道之间的隔离度、一致性、可控初相等问题均是实际系统需要考虑的问题。

4 相干FDA雷达

尽管FDA发射导向矢量中包含目标检测点的距离信息，当各个天线发射波形仅相差一个很小的频率偏差，可近似认为发射相干信号，此时电磁波在空间远场合成了一定的方向图，而接收端不能分离各个发射天线对应的信号， FDA带来的距离信息得不到充分的利用。若要获得分离的发射信号，需要采用MIMO技术，FDA-MIMO雷达体制能够充分发挥FDA的优势，获得距离维自由度，具有灵活的信号处理能力。根据FDA雷达各个天线单元发射波形的特性，本文将FDA雷达分为3类：

● 相干FDA雷达：不同的天线单元之间发射波形仅存在微小的频率偏差，即所有天线单元发射的信号包络完全一致，从基带信号的频谱来看，其发射信号的频谱几乎是重叠的，因此称之为相干FDA雷达；

● 相关FDA雷达：不同天线单元发射的信号不仅存在微小的频率偏差，而且信号的包络也存在差异，不同单元之间的发射信号满足一定的相关性；

● 正交FDA雷达：不同天线单元发射的信号不仅存在微小的频率偏差，而且信号的包络满足正交性条件，即具有MIMO雷达的波形性质，该体制称之为FDA-MIMO雷达，可以获得FDA的距离角度2维依赖的发射导向矢量。

本节讨论相干FDA雷达的接收信号过程及相应的信号处理技术。这里考虑由FDA发射的信号达到远场目标，然后由目标回到接收端的过程。考虑远场窄带假设条件下，由M个天线发射信号，到达空间远场距离R、角度θ的目标位置，并后向散射至接收天线。第n个接收天线单元接收到的回波信号可表示为：

$$
\begin{aligned}
&r_n\left(\theta,t-\frac{2R}{c}\right)\\
&=\sum_{m=1}^{M}\mathrm{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_\mathrm{p}}\right)\cdot\exp\Bigg\{\mathrm{j}2\pi f_m\\
&\quad\cdot\left(t-\frac{2R-d(m-1)\sin(\theta)-d(n-1)\sin(\theta)}{c}\right)\Bigg\}\\
&\approx\mathrm{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_\mathrm{p}}\right)\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d}{\lambda_0}(n-1)\sin(\theta)\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_0\left(t-\frac{2R}{c}\right)\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}(M-1)\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right\}\\
&\quad\cdot\frac{\sin\left(M\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right)}
\end{aligned}\tag{10}
$$

类似地，式(10)推导过程中省略了相位中关于阵元序号m的2次项。不失一般性，考虑接收端由N个天线单元组成。当采用同样的天线单元进行发射和接收时，则有N=M。因此，在接收端可得经接收波束形成后的信号形式为：

$$
\begin{aligned}
&y\left(\theta,t-\frac{2R}{c}\right)\\
&=\mathrm{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_\mathrm{p}}\right)\\
&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}(N-1)\pi\frac{d}{\lambda_0}\Big(\sin(\theta)-\sin(\theta_0)\Big)\right\}\\
&\quad\cdot\frac{\sin\left(N\pi\frac{d}{\lambda_0}\Big(\sin(\theta)-\sin(\theta_0)\Big)\right)}{\sin\left(\pi\frac{d}{\lambda_0}\Big(\sin(\theta)-\sin(\theta_0)\Big)\right)}\\
&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_0\left(t-\frac{2R}{c}\right)\right\}\\
&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}(M-1)\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right\}\\
&\quad\cdot\frac{\sin\left(M\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta)\right)\right)}
\end{aligned}\tag{11}
$$

注意到在式(11)中，接收波束形成过程中采用了指向θ_0方向的权矢量，即：

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{w}_\mathrm{R}(\theta_0)=\Bigg[&1,\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d}{\lambda_0}\sin(\theta_0)\right\},\cdots,\\
&\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d}{\lambda_0}(N-1)\sin(\theta_0)\right\}\Bigg]^\mathrm{T}
\end{aligned}\tag{12}
$$

对应的接收方向图为：

$$F_{\mathrm{R}}\left(\theta|\,\theta_0\right)=\exp\left\{\mathrm{j}\left(N-1\right)\pi\frac{d}{\lambda_0}\left(\sin\left(\theta\right)-\sin\left(\theta_0\right)\right)\right\}\cdot\frac{\sin\left(N\pi\dfrac{d}{\lambda_0}\left(\sin\left(\theta\right)-\sin\left(\theta_0\right)\right)\right)}{\sin\left(\pi\dfrac{d}{\lambda_0}\left(\sin\left(\theta\right)-\sin\left(\theta_0\right)\right)\right)}\tag{13}$$

因此，式中对应发射方向图可表示为：

$$\begin{aligned}&F_{\mathrm{T}}\left(t,R,\theta\right)\\&=\mathrm{rect}\left(\frac{t-2R/c}{T_{\mathrm{p}}}\right)\\&\quad\cdot\exp\left\{\mathrm{j}\left(M-1\right)\pi\left(\Delta f\left(t-\frac{2R}{c}\right)+\frac{d}{\lambda_0}\sin\left(\theta\right)\right)\right\}\\&\quad\cdot\frac{\sin\left(M\pi\left(\Delta f\left(t-\dfrac{2R}{c}\right)+\dfrac{d}{\lambda_0}\sin\left(\theta\right)\right)\right)}{\sin\left(\pi\left(\Delta f\left(t-\dfrac{2R}{c}\right)+\dfrac{d}{\lambda_0}\sin\left(\theta\right)\right)\right)}\end{aligned}\tag{14}$$

式(13)不同于式(9)，由于是在接收端得到发射信号相干叠加的结果，传播的距离为双程距离。脉冲波形体制下，当脉冲持续时间满足条件$T_{\mathrm{p}}=1/\Delta f$时，发射波束可以覆盖所有角度范围。这种情况下，尽管FDA的发射方向图在各个角度上的功率是相同，不具备相控阵发射方向图的指向性，但也不同于MIMO的统计均匀照射，因为FDA的发射方向图具有距离角度耦合特性。因此，当角度值确定之后，其发射方向图存在距离维方向图。另外，FDA的频率步进量很小，而距离维方向图的周期为$c/(2\Delta f)$，较雷达距离分辨率$c/(2B)$大得多，其中B为基带信号的带宽，因此依靠FDA实现距离参数估计的精度是有限的。

图5和图6分别给出了不同脉冲持续时间条件下的联合发射-接收2维波束形成的结果，这里不仅考虑了FDA接收端的信号合成，同时考虑了传统的接收波束形成。图5对应的脉冲持续时间满足全空域覆盖的要求，即$T_{\mathrm{p}}=1/\Delta f$，图6对应的脉冲持续时间仅能满足覆盖$[-30°, 30°]$的空域，即$T_{\mathrm{p}}=1/(2\Delta f)$。这种情况下，发射信号在空间相干叠加，在接收端不能分离各个发射信号，因此，阵列可控的自由度只有接收自由度。由图5和图6的仿真结果可见，FDA在接收端处理是可以完成目标的距离和角度的联合估计的，尽管其距离维估计的精度有限，但在某些场景下也有一定的参考价值。具体来说，对于发射单频脉冲体制的相控阵，其距离维分辨率为$cT_{\mathrm{p}}/2$；而对于每个天线单元发射单载频信号且脉宽为$T_{\mathrm{p}}=1/\Delta f$的FDA，由于其具有距离维方向图，距离分辨率为$c/(2M\Delta f)=cT_{\mathrm{p}}/(2M)$，相

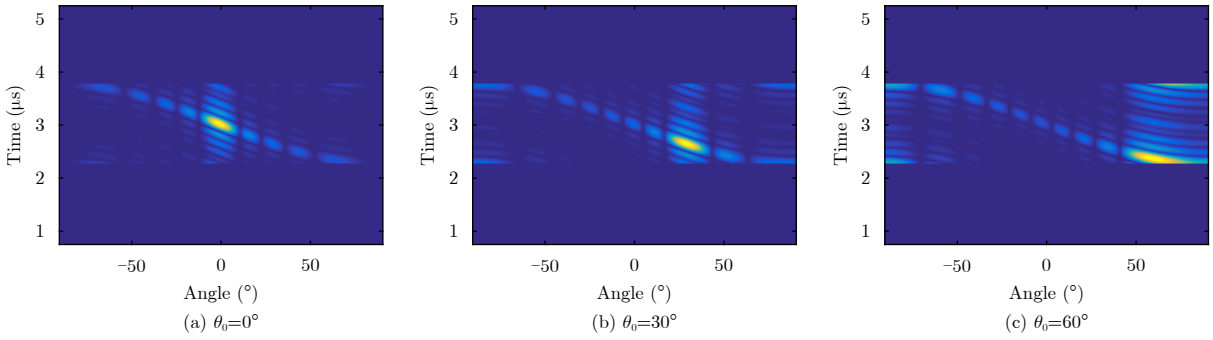


图 5 脉冲体制发射-接收联合波束形成，$T_{\mathrm{p}}=1/\Delta f$

Fig. 5　Joint tranmit-receive beamforming with pulsed FDA, $T_{\mathrm{p}}=1/\Delta f$

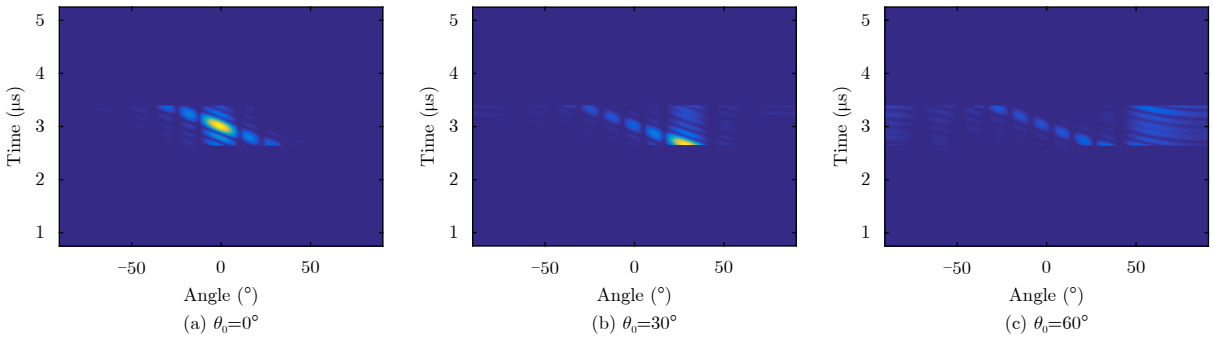


图 6 脉冲体制发射-接收联合波束形成，$T_{\mathrm{p}}=1/(2\Delta f)$

Fig. 6　Joint tranmit-receive beamforming with pulsed FDA, $T_{\mathrm{p}}=1/(2\Delta f)$

当于距离分辨率提高了M倍。实质上，由于不同的天线单元辐射的信号频率存在差异，等效的系统信号带宽为$M\Delta f{=}M/T_{\mathrm{p}}$，相比于单频脉冲体制的相控阵也增大了$M$倍。当然，对于脉冲压缩波形，脉冲内有调制，如相位编码信号、线性调频信号等，由脉冲压缩得到的距离分辨率可能会远高于由FDA带来的距离分辨率。此外，由仿真结果可见，通过接收波束形成指向不同的空间方向，形成的联合发射-接收波束的主瓣指向了不同的角度和不同的距离。因此，相干FDA 2维波束域的处理器响应具有角度和距离两维可调节的能力，具有更强的抗干扰能力。

尽管相干FDA雷达体制并不能获得发射导向矢量，然而其具有宽角度覆盖能力，是设计雷达“宽发窄收”的有效方式，在某些应用场景下能够大大改善雷达空间监视的效率和能力。作者认为至少在以下几个方面仍需要开展进一步的研究工作：

(1) 相干FDA雷达回波信号的接收处理技术：考虑通过接收处理实现等效的发射-接收联合波束形成，对于脉冲内存在调制波形的相干FDA雷达，需要考虑快时间和角度的2维匹配接收处理；

(2) 相干FDA雷达在接收端波束域信号处理技术：考虑如何接收端多波束，获得距离和角度2维信息，提高信号处理的能力，提高目标参数估计精度；

(3) 相干FDA雷达脉冲积累与多普勒处理技术：不同脉冲起始时刻对应的阵元间的初始相位关系可能发生了变化，并将会引起天线方向图脉冲与脉冲间的变化，从而改变了方向图在脉冲之间的相干性，在这种情况下，相干多普勒处理将变得复杂，甚至会带来问题。实际上，当设计频率步进量是脉冲重频的整数倍关系时，相干FDA雷达发射方向图在脉冲之间满足相干性；

(4) 雷达发射机的设计技术：包括频率步进信号的产生方式、天线单元初始相位的影响、脉内波形的设计、空间角度的覆盖、发射信号的频谱等等。

5 FDA-MIMO雷达

为简便起见而又不失一般性，忽略天线的单元方向图和阵列误差等因素，假定发射和接收天线单元为全向辐射、各向同性、均匀一致的。对于FDA-MIMO体制，雷达发射信号的形式可以表示为：

$$s_m(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{t}{T_{\mathrm{p}}}\right)\varphi_m(t)\exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_m t\right\} \tag{15}$$

其中，$\varphi_m(t)$为第m个发射单元对应的基带调制信号，通常在雷达系统中，发射信号的幅度是恒定的，可调的是基带信号的相位和频率，而相位是频率对时间的积分。理论上，FDA-MIMO的基带波形设计应满足正交条件，即为[79,81]：

$$\int\varphi_m(t)\varphi_{m'}^{*}(t-\tau)\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\Delta f(m-m')t\right\}\mathrm{d}t=0,1\le m,m'\le M,m\ne m',\forall\tau \tag{16}$$

实际中，由于波形正交性需要在无穷多的时延条件下均成立，且满足发射波形之间两两正交，这些约束条件导致该问题为超定规划问题，需要寻找次优解。并且实际雷达发射机的末级功率放大器通常工作于饱和状态，波形设计需要满足恒定功率的约束，即所谓的恒模约束；此外，通道随机误差的存在，使得多相编码数目必须是离散有限的，编码数越多，对系统的精度要求越高。雷达波形设计是在满足系统约束条件下的优化问题。

实际应用中，FDA-MIMO雷达的频率步进量可以在基带采用直接数字合成(Direct Digital Synthesizer, DDS)技术实现，具有很高的频率精度。从FDA-MIMO雷达实现结构来看，包括发射接收和接收结构，其都与现有雷达体制有着较大的差异。图7给出了一种FDA-MIMO雷达发射波形设计与实现结构。在基带信号产生时进行频率步进信号的调制，采用高精度的时钟参考信号，经过DDS后可得频率步进信号，并与发射正交波形相乘后送入基带模拟通道，经上变频从天线辐射出去。图8给出了FDA-MIMO雷达任意接收天线单元对应的接收处理基本结构[80]。接收信号经过混频和采样之后，通过数字混频技术(该模块为FDA-MIMO雷达所特有的，也是FDA-MIMO雷达接收处理的关键)、正交波形匹配后输出，并进行后续的信号处理。这里的数字混频是在全时间域进行的。

接收到的目标回波信号经过对参考载频的混频处理、对步进频率的数字混频处理、正交波形的匹配滤波处理之后可以表达为矢量形式如下(具体推导见附录)：

$$\boldsymbol{s}=\xi_{\mathrm{s}}\boldsymbol{a}(R,\theta)\otimes\boldsymbol{b}(\theta) \tag{17}$$

其中，ξ_{s}表示包含天线发射和接收、电磁波传播、目标后向散射、脉冲压缩处理增益等在内的目标回波复系数，$\boldsymbol{a}(R,\theta)$为发射导向矢量，$\boldsymbol{b}(\theta)$为接收导向矢量，其表达形式为：

$$\boldsymbol{a}(R,\theta)=\left[1,\exp\left\{-\mathrm{j}4\pi\frac{\Delta fR}{c}+\mathrm{j}2\pi\frac{d_{\mathrm{T}}}{\lambda_0}\cos(\theta)\right\},\cdots,\exp\left\{-\mathrm{j}4\pi\frac{\Delta fR}{c}(M-1)+\mathrm{j}2\pi\frac{d_{\mathrm{T}}}{\lambda_0}(M-1)\cos(\theta)\right\}\right]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{b}(\theta)=\left[1,\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_{\mathrm{R}}}{\lambda_0}\cos(\theta)\right\},\cdots,\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_{\mathrm{R}}}{\lambda_0}(N-1)\cos(\theta)\right\}\right]^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

其中，d_{T}和d_{R}分别表示发射和接收阵列的阵元间距。与传统MIMO雷达的最大的区别在于，FDA-MIMO雷达中发射导向矢量中包含了目标信号的距离信息，这一距离信息与传统意义上由回波的时延确定的距离信息是不同的。该距离信息提供了雷达在发射空间域区分不同目标的能力，即使这些目标可能位于相同的距离门。

基于上述分析可知，FDA-MIMO雷达能够区分距离模糊的目标信号，这为解决高重频体制下的目标距离模糊问题提供了一条新的途径。尽管不同的目标信号在时域上重叠在一起，仅能测量目标信号的无模糊距离，然而由于FDA-MIMO雷达发射导向矢量中包含目标的真实距离，可以有效解决目标的距离模糊重数的估计问题，文献[81]提出了基于FDA-MIMO雷达的距离角度联合估计方法。例如，假设场景中有一个压制式白噪声干扰源和4个位于天线法线方向、距离不同的点目标，且这些目标依次间隔刚好一个模糊距离，故出现在同一个雷达距离门内。图9给出了传统MIMO雷达和FDA-MIMO雷达体制下的干扰和目标的功率谱分布。可以看到，压制干扰能量的分布仅与其空间角度有关，在发射频率域分布为白色谱，在接收频率域的分布与其方向对应，并且在两种体制下的分布没有区别。但是目标信号的分布却不同：来自空间同一方向的目标信号，在传统MIMO雷达体制下，其出现的位置是重合的；但在FDA-MIMO雷达体制下，4个目标位于不同的位置，这是由于FDA-MIMO雷达发射导向矢量中包含了目标的距离信息。在传统雷达中，通常采用参差重频技术解决目标距离模糊问题，而在FDA-MIMO雷达中，采用单一重频就可以实现目标真实距离参数的估计。

当联合考虑脉冲维自由度时，则FDA-MIMO雷达可构成发射阵元-接收阵元-脉冲3维自由度，进而可以充分利用目标、杂波、干扰等在3维空间中的分布特性，解决传统MIMO雷达和相控阵雷达难以解决的问题。这里给出运动平台(机载、星载等)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举例，具体详情见文献[77–79]。研究表明，FDA-MIMO雷达提供了距离维的自由度，可以分辨不同距离模糊区的回波信号，因此可以并行处理不同距离模糊区的杂波抑制和动目标检测问题，理论上不受其他距离模糊区的

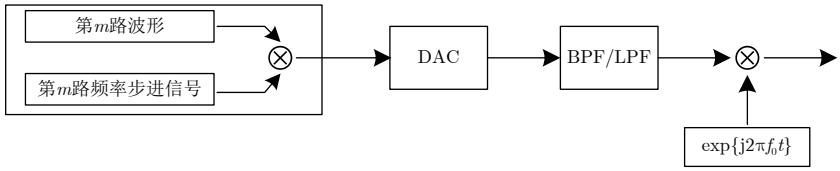


图 7 FDA-MIMO雷达发射信号实现结构

Fig. 7　Transmit procedure of FDA-MIMO radar

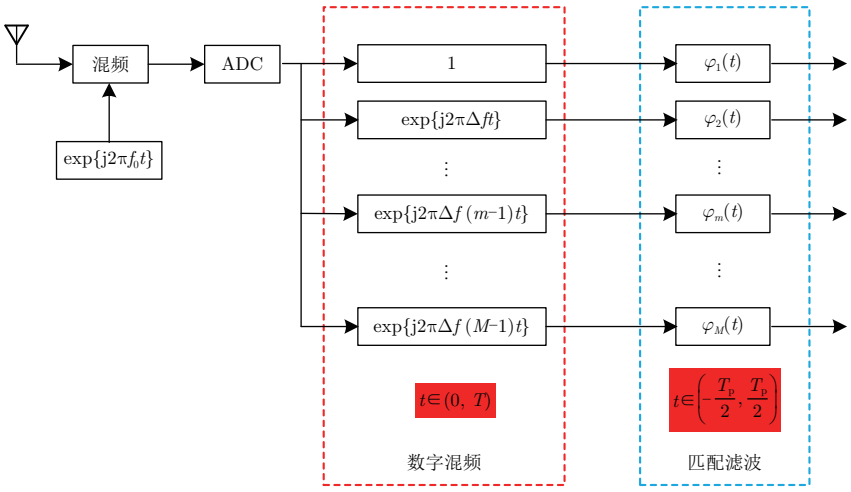
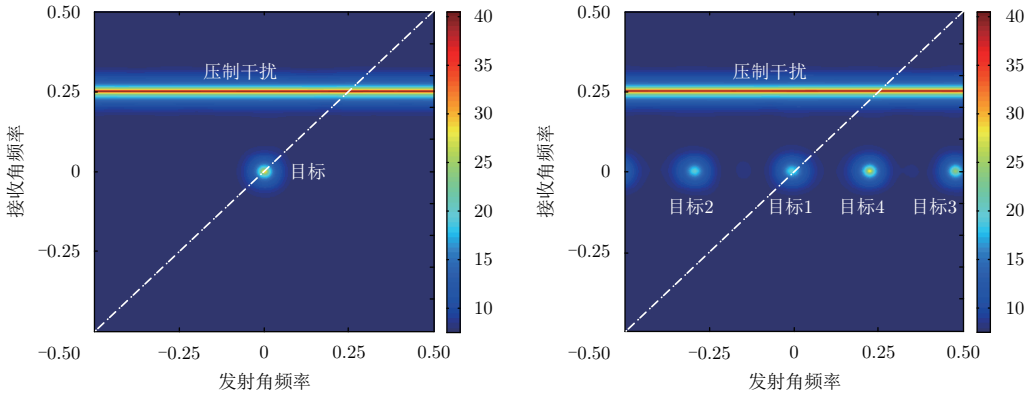


图 8 FDA-MIMO雷达接收处理结构

Fig. 8　Receive procedure of FDA-MIMO radar



(a) 传统 MIMO 雷达
(a) Traditonal MIMO radar

(b) FDA-MIMO 雷达
(b) FDA-MIMO radar

图 9 干扰和目标的功率谱分布图

Fig. 9 Spectra distribution of barrage jamming and targets

回波信号的影响。这意味着，传统运动平台不再需要采用低重频来避免杂波模糊问题，中重频和高重频而导致的杂波模糊问题可以得到有效的解决。图10给出了运动平台FDA-MIMO雷达中杂波或目标在发射-接收2维频率域中的功率谱分布示意图。由图可见，不同的距离模糊区域所对应的杂波在发射-接收2维空间是彼此分离的，这与传统MIMO雷达是不同的。此外，由于采用正交波形，雷达具有覆盖整个观测空间的能力，并可以在接收端等效形成发射方向图实现不同方向的目标检测。综上所述，FDA-MIMO雷达通过接收端处理实现空间不同角度、不同距离模糊区域的目标检测，该处理过程可以并行高效地进行。图11给出了FDA-MIMO雷达局域化处理的原理图，图示中给出了针对第

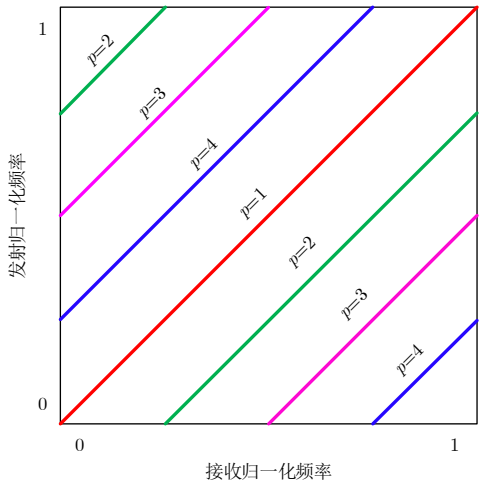


图 10 运动平台FDA-MIMO雷达发射-接收2维域的功率谱分布示意图

Fig. 10 Spectra distribution of signal in transmit-receive two-dimensional domain with FDA-MIMO radar mounted on moving platform

1距离模糊区、天线法线方向的运动目标检测的局域化多波束示意图。

FDA-MIMO雷达的另外一个重要应用是干扰对抗，由于其具有距离维自由度，理论上是可以对抗传统角度维自适应处理难以对抗的主瓣干扰。由于主瓣干扰的空间方向与期望的目标方向相同，导致传统空域自适应处理技术性能损失严重，而FDA-MIMO雷达可以利用目标和干扰在距离维度上的差异，实现主瓣方向的干扰抑制。初步分析表明，FDA-MIMO雷达不能解决主瓣方向的压制干扰对抗问题，因为压制式干扰不依赖于雷达的发射信号。此外，即使是FDA-MIMO雷达对抗欺骗式干扰，也需要先验已知真实目标的部分信息，如估计的目标距离和角度，并且转发的干扰至少延迟1个脉冲重复周期。对于快速转发的欺骗式干扰对抗问题尚需要进一步的论证分析。图12给出了真实目标和假目标的分布示意图，由图可见，真实目标在发射-接收2维空间频率域的分布是沿对角线分布的。而假目标由于时间延迟而位于不同的接收脉冲

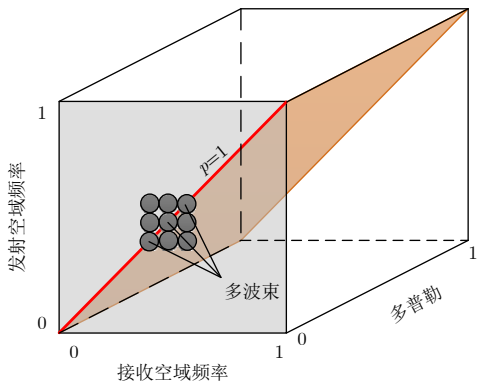


图 11 多维局域化处理示意图

Fig. 11 Scheme of multi-dimensional localized processing

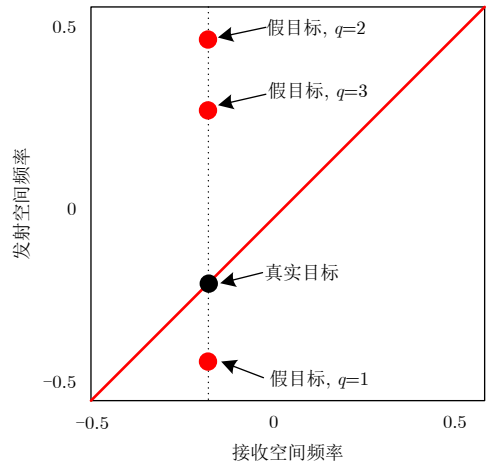


图 12 干扰机真实目标和假目标在发射-接收2维空间频率域的分布

Fig. 12 Distribution of True and false targets in transmit-receive two-dimensional spatial frequency domain

内，其在发射-接收2维空间频率域的分布也不同于真实目标。文献[82]初步探讨了FDA-MIMO雷达对抗主瓣干扰的问题，其干扰信号忽略了在干扰机中的存储时间是错误的，实际上，若没有先验的目标信息，FDA-MIMO雷达并不能够分辨真假目标。

对于FDA-MIMO雷达体制，其提供了距离维可控自由度，将提升雷达信号处理的能力，作者认为至少在以下几个方面仍需要开展进一步的研究工作：

(1) FDA-MIMO波形设计与优化：相比于MIMO雷达，其波形设计的目标是一致的，但其形式上，由于频率步进量的存在而具有差异性，相应的优化方法也会有所不同；

(2) FDA-MIMO雷达系统性能分析：需要充分考虑发射通道正交性、隔离度、通道一致性、幅相误差等因素下的系统性能，分析满足一定应用需求条件下的系统指标；

(3) 基于FDA-MIMO雷达的干扰对抗技术：可望利用FDA-MIMO雷达的距离维可控自由度，解决传统雷达体制面临的主瓣干扰对抗难题，同时需要考虑欺骗干扰的伪随机距离分布特性、转发干扰信号与目标回波信号构成相干源信号等实际问题；

(4) 基于FDA-MIMO雷达解决与距离模糊有关的应用问题：利用FDA-MIMO雷达的距离维可控自由度，可望解决目标参数解模糊问题、模糊杂波抑制问题、高分辨宽测绘成像问题、高速平台的距离多普勒多重模糊问题等等；

(5) 基于FDA-MIMO雷达的多维信号处理技术：综合利用FDA-MIMO雷达在距离维、角度维、多普勒维、以及极化维等多维自由度，开展信号检测与识别处理等。

6　结束语

本文从雷达应用的角度综述了FDA雷达技术的研究进展，指出了现有FDA的研究中取得的关键进展，分析并给出了FDA的发射天线方向图、电磁波传播中所关心的主要问题，进一步给出了相干FDA雷达和FDA-MIMO雷达两种体制的概念、信号特征以及潜在的应用优势，分析了两种体制需要解决的关键技术问题。总之，FDA雷达作为波形分集阵雷达的一种形式，是有别于相控阵雷达和MIMO雷达的一种新体制雷达。通过合理的系统设计和信号处理，可以获得额外的距离维可控自由度，增加了雷达系统信号处理的维度，有望支撑新的应用，解决传统体制难以解决的问题。

附录

考虑窄带假设条件下，对于位于距离R，角度θ的远场目标，第n个天线接收到的回波信号形式为：

$$\begin{aligned} r_n\left(t-\tau_0\right) \approx & \exp\left\{\mathrm{j}2\pi f_0\left(t-\tau_0\right)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{\mathrm{j}2\pi \frac{d_{\mathrm{R}}}{\lambda_0}\left(n-1\right)\sin\left(\theta\right)\right\} \\ & \cdot \sum_{m=1}^{M} \varphi_m\left(t-\tau_0\right) \\ & \cdot \exp\left\{\mathrm{j}2\pi\Delta f\left(m-1\right)\left(t-\tau_0\right)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{\mathrm{j}2\pi \frac{d_{\mathrm{T}}}{\lambda_0}\left(m-1\right)\sin\left(\theta\right)\right\} \end{aligned} \tag{A-1}$$

其中，τ_0=$2R/c$表示参考延迟时间，d_{T}和d_{R}分别表示发射和接收阵列的阵元间距，$\varphi_m(t)$为第m个发射单元对应的基带调制信号。则，第n个天线的接收信号经模拟混频和数字混频(对第m个发射天线)之后，信号形式表示为：

$$\begin{aligned} r_{m,n}\left(t-\tau_0\right) \approx & \exp\left\{-\mathrm{j}2\pi f_0\tau_0\right\}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi \frac{d_{\mathrm{R}}}{\lambda_0}\left(n-1\right)\sin\left(\theta\right)\right\}\Bigg(\varphi_m\left(t-\tau_0\right)\exp\Big\{-\mathrm{j}2\pi\Delta f\left(m-1\right)\tau_0\Big\} \\ & \cdot \exp\left\{\mathrm{j}2\pi \frac{d_{\mathrm{T}}}{\lambda_0}\left(m-1\right)\sin\left(\theta\right)\right\} + \sum_{m'=1,m'\neq m}^{M}\Big\{\varphi_{m'}\left(t-\tau_0\right)\exp\Big\{\mathrm{j}2\pi\Delta f\left(m'-m\right)t\Big\} \\ & \cdot \exp\Big\{-\mathrm{j}2\pi\Delta f\left(m'-1\right)\tau_0\Big\}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi \frac{d_{\mathrm{T}}}{\lambda_0}\left(m'-1\right)\sin\left(\theta\right)\right\}\Big\}\Bigg) \end{aligned} \tag{A-2}$$

经过第m路波形对应的匹配滤波处理后，信号可表示为：

$$\begin{aligned} r_{m,n}(\tau-\tau_0) = r_{m,n}(t-\tau_0) * h_m^*(t-\tau) \approx \exp\{-\mathrm{j}2\pi f_0\tau_0\}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_\mathrm{R}}{\lambda_0}(n-1)\sin(\theta)\right\} \\ \cdot\left(\mathrm{sinc}(\tau-\tau_0)\exp\{-\mathrm{j}2\pi\Delta f(m-1)\tau_0\}\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_\mathrm{T}}{\lambda_0}(m-1)\sin(\theta)\right\}\right. \\ +\sum_{m'=1,m'\neq m}^{M}\left\{\varphi_{m'}(t-\tau_0)\varphi_m^*(t-\tau)\exp\{\mathrm{j}2\pi\Delta f(m'-m)t\}\exp\left\{-\mathrm{j}2\pi\Delta f(m'-1)\tau_0\right\}\right. \\ \left.\left.\cdot\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_\mathrm{T}}{\lambda_0}(m'-1)\sin(\theta)\right\}\right\}\right) \end{aligned} \tag{A-3}$$

考虑FDA-MIMO雷达体制下的理想波形正交条件，如式(16)，可得接收信号形式为：

$$\begin{aligned} r_{m,n}(\tau-\tau_0) = \exp\{-\mathrm{j}2\pi f_0\tau_0\} \\ \cdot\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_\mathrm{R}}{\lambda_0}(n-1)\sin(\theta)\right\} \\ \cdot\mathrm{sinc}(\tau-\tau_0)\exp\left\{-\mathrm{j}2\pi\Delta f(m-1)\frac{2R}{c}\right\} \\ \cdot\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\frac{d_\mathrm{T}}{\lambda_0}(m-1)\sin(\theta)\right\} \end{aligned} \tag{A-4}$$

因此，将N个接收天线分别对应的M个发射天线的回波数据，排列成矢量形式可得

$$\begin{aligned} \boldsymbol{s} &= \left[r_{1,1}(\tau-\tau_0), r_{1,2}(\tau-\tau_0), \cdots, r_{M,N}(\tau-\tau_0)\right]^\mathrm{T} \\ &= \xi_\mathrm{s}\boldsymbol{a}(R,\theta)\otimes\boldsymbol{b}(\theta) \end{aligned} \tag{A-5}$$

其中$\xi_\mathrm{s}=\mathrm{sinc}(\tau-\tau_0)\exp\{-\mathrm{j}2\pi f_0\tau_0\}$为目标的系数，$\boldsymbol{a}(R,\theta)$和$\boldsymbol{b}(\theta)$分别为发射导向矢量和接收导向矢量。

参 考 文 献

[1] 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, Orlando, USA, 2006: 140–144.

[2] Antonik P, Wicks M C, Griffiths H D, *et al*.. Frequency diverse array radars[C]. Proceedings of 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, USA, 2006: 215–217.

[3] Antonik P, Wicks M C, Griffiths H D, *et al*.. Multi-mission multi-mode waveform diversity[C]. Proceedings of 2006 IEEE Conference on Radar, Verona, NY, USA, 2006: 580–582.

[4] Wicks M C and Antonik P. Frequency diverse array with independent modulation of frequency, amplitude, and phase[P]. USA, 7319427, 2008.

[5] Wicks M C and Antonik P. Method and apparatus for a frequency diverse array[P]. USA, 7511665, 2009.

[6] Antonik P. An investigation of a frequency diverse array[D]. [Ph.D. dissertation], University College London, 2009.

[7] Calderbank R, Howard S D, and Moran B. Waveform diversity in radar signal processing: A focus on the use and control of degrees of freedom[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1): 32–41. DOI: 10.1109/MSP.2008.930414.

[8] Wicks M C, Rangaswamy M, Adve R, *et al*.. Space-time adaptive processin: A knowledge-based perspective for airborne radar[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 51–65. DOI: 10.1109/MSP.2006.1593337.

[9] 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. DOI: 10.1049/el:20062791.

[10] Secmen M, Demir S, Hizal A, *et al*.. Frequency diverse array antenna with periodic time modulated pattern in range and angle[C]. Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2007: 427–430.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Eker T. A conceptual evaluation of frequency diverse arrays and novel utilization of LFMCW[D]. [Ph.D. dissertation], Middle East Technical University, 2011.

[14] Huang J J, Tong K F, Woodbridge K, *et al*.. Frequency diverse array: Simulation and design[C]. Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, USA, 2009: 1–4.

[15] Huang J J, Tong K F, and Baker C J. Frequency diverse array with beam scanning feature[C]. Proceedings of 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, USA, 2008: 1–4.

[16] Higgins T, Blunt S D, and Shackelford A K. Space-range adaptive processing for waveform-diverse radar imaging[C].

Proceedings of 2010 IEEE Radar Conference, Washington, DC, USA, 2010: 321–326.

[17] Farooq J, Temple M A, and Saville M A. Application of frequency diverse arrays to synthetic aperture radar imaging[C]. Proceedings of 2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, Italy, 2007: 447–449.

[18] Farooq J, Temple M A, and Saville M A. Exploiting frequency diverse array processing to improve SAR image resolution[C]. Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–5.

[19] Jones A M and Rigling B D. Planar frequency diverse array receiver architecture[C]. Proceedings of 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 2012: 145–150.

[20] Sammartino P F and Baker C J. Developments in the frequency diverse bistatic system[C]. Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, USA, 2009: 1–5.

[21] Sammartino P F and Baker C J. The frequency diverse bistatic system[C]. Proceedings of 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, FL, USA, 2009: 155–159.

[22] Sammartino P F, Baker C J, and Griffiths H D. Range-angle dependent waveform[C]. Proceedings of 2010 IEEE Radar Conference, Washington, DC, USA, 2010: 511–515.

[23] 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.

[24] Wang W Q, Shao H Z, and Cai J Y. Range-angle-dependent beamforming by frequency diverse array antenna[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, 2012: 760489.

[25] 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.

[26] 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.

[27] Wang W Q. Phased-MIMO Radar with frequency diversity for range-dependent beamforming[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(4): 1320–1328. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2232909.

[28] Zhuang L, Liu X Z, and Yu W X. Precisely beam steering for frequency diverse arrays based on frequency offset selection[C]. Proceedings of 2009 International Radar Conference-Surveillance for a Safer World, Bordeaux, France, 2009: 1–4.

[29] Zhuang L and Liu X Z. Application of frequency diversity to suppress grating lobes in coherent MIMO radar with separated subapertures[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009, 2009: 481792. DOI: 10.1155/2009/481792.

[30] Xu Y H, Shi X W, Xu J W, *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.v25.5.

[31] Xu J W, Liao G S, and Zhu S Q. Receive beamforming of frequency diverse array radar systems[C]. Proceedings of the 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Beijing, China, 2014: 1–4.

[32] 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.

[33] 胡柏林, 廖桂生, 许京伟, 等. 前视阵频率分集雷达空时杂波特性研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2693–2699. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00077.

Hu Bo-lin, Liao Gui-sheng, Xu Jing-wei, *et al*.. Study on space-time character of clutter for forward-looking frequency diverse array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2693–2699. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00077.

[34] 张福丹. 基于频率分集阵列的聚束SAR虚拟辐射源[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 420–423, 434. DOI: 10.11805/TKYDA201303.0420.

Zhang Fu-dan. Virtual radiation source of a spotlight SAR based on frequency diverse array[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(3): 420–423, 434. DOI: 10.11805/TKYDA201303.0420.

[35] 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.

[36] 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.

Wang Wen-qin, Shao Huai-zong, 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.

[37] Wang Y B, Wang W Q, and Chen H. Linear frequency diverse array manifold geometry and ambiguity analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(2): 984–993. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2359074.

[38] Wang W Q, So H C, and Shao H Z. 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.

[39] Wang W Q. Two-dimensional imaging of targets by stationary frequency diverse array[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(11): 1067–1076. DOI: 10.1080/2150704X.2013.837228.

[40] Wang Y B, Wang W Q, and Shao H Z. Frequency diverse array radar Cramér-Rao lower bounds for estimating direction, range, and velocity[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 2014: 830869.

[41] 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.

[42] 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*, 2014, 8(1): 106–114. DOI: 10.1109/JSTSP.4200690.

[43] 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.

[44] Gao K D, Shao H Z, Chen H, *et al.*. Impact of frequency increment errors on frequency diverse array MIMO in adaptive beamforming and target localization[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 44: 58–67. DOI: 10.1016/j.dsp.2015.05.005.

[45] 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.

[46] 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(4): 2199–2213. DOI: 10.1007/s11277-015-2342-1.

[47] Khan W, Qureshi I M, and Saeed S. Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 499–502. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2368977.

[48] 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.

[49] Khan W, Qureshi I M, Sultan K, *et al.*. Properties of ambiguity function of frequency diverse array radar[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(9): 813–822. DOI: 10.1080/2150704X.2014.969813.

[50] 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.

[51] 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.

[52] Wang Y X, Li W, Huang G C, *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.

[53] 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.

[54] Guo R J, Ni Y H, Liu H J, *et al.*. Signal diverse array radar for electronic warfare[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2906–2910. DOI: 10.1109/LAWP.2017.2751648.

[55] Li Q, Huang L, Zhang P C, *et al.*. Beampattern synthesis for frequency diverse array via reweighted l_1 iterative phase compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 467–475. DOI: 10.1109/TAES.2017.2735638.

[56] 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*, 2017. DOI: 10.1109/TAES.2017.2785598.

[57] 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: 1405–1408. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2340893.

[58] Wang W Q. Cognitive frequency diverse array radar with situational awareness[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 359–369.

[59] 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. DOI: 10.1017/S1759078715001221.

[60] Xu Y H, Shi X W, 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*, 2015, 15: 1479–1482.

[61] Xu Y H, Shi X W, Xu J W, *et al.*. Range-angle-decoupled beampattern synthesis with subarray-based frequency

diverse array[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 64: 49–59. DOI: 10.1016/j.dsp.2017.02.005.

[62] Li W T, Hei Y Q, Shi X W, *et al*.. Range-angle-dependent beamforming with FDA using four-dimensional arrays[J]. *Signal Processing*, 2018, 147: 68–79. DOI: 10.1016/j.sigpro.2018.01.016.

[63] Xu J W, Lan L, Liao G S, *et al*.. Range-angle matched receiver for coherent FDA radars[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 324–328.

[64] 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.

[65] Wang W Q. Overview of frequency diverse array in radar and navigation applications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1001–1012.

[66] 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.

[67] 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.

[68] Turhaner A, Demir S, and Hizal A. Monopulse direction finding for linear frequency modulation based frequency diverse array[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA, USA, 2017: 89–94.

[69] 郑昱. 基于频率分集阵列的波束形成研究[J]. 现代雷达, 2015, 37(8): 29–32, 36. DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.08.007.
Zheng Yu. A study on the beam forming of frequency diverse array[J]. *Modern Radar*, 2015, 37(8): 29–32, 36. DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.08.007.

[70] 张昭建, 谢军伟, 李欣, 等. 频率分集阵列的有源假目标鉴别方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(4): 69–76. DOI: 10.11887/j.cn.201704011.
Zhang Zhao-jian, Xie Jun-wei, Li Xin, *et al*.. Deceptive jamming suppression and discrimination based on frequency diversity array[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(4): 69–76. DOI: 10.11887/j.cn.201704011.

[71] 吴旭姿, 刘峥, 谢荣. 基于俯仰频率分集技术的波束形成方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3070–3077. DOI: 10.11999/JEIT160667.
Wu Xu-zi, Liu Zheng, and Xie Rong. Beamforming with vertical frequency diverse array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3070–3077. DOI: 10.11999/JEIT160667.

[72] 王伟伟, 吴孙勇, 许京伟, 等. 基于频率分集阵列的机载雷达距离模糊杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2321–2327. DOI: 10.11999/JEIT150187.
Wang Wei-wei, Wu Sun-yong, Xu Jing-wei, *et al*.. Range ambiguity clutter suppression for airborne radar based on frequency diverse array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(10): 2321–2327. DOI: 10.11999/JEIT150187.

[73] 许京伟, 廖桂生. 前视阵FDA-STAP雷达距离模糊杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 386–392. DOI: 10.12000/JR15101.
Xu Jing-wei and Liao Gui-sheng. Range-ambiguous clutter suppression for forward-looking frequency diverse array space-time adaptive processing radar[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(4): 386–392. DOI: 10.12000/JR15101.

[74] 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.

[75] 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.

[76] 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. DOI: 10.1109/TSP.2018.2815011.

[77] 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.

[78] 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.

[79] 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.

[80] 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.

[81] 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.

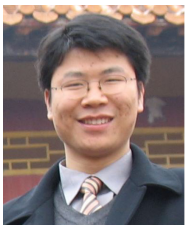
[82] Xu J W, Liao G S, Zhu S Q, *et al*.. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9–17. DOI: 10.1016/j.sigpro.2015.01.014.

[83] Xu J W, Xu Y H, and Liao G S. Direct data domain based adaptive beamforming for FDA-MIMO radar[C]. Proceedings of 2016 IEEE Statistical Signal Processing Workshop, Palma de Mallorca, Spain, 2016: 1–5.

作 者 简 介

许京伟(1987–)，男，山东人，博士，讲师。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讲师。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(频率分集阵和空时编码阵)等。

E-mail: xujingwei1987@163.com



朱圣棋(1984–)，男，江西人，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，西安电子科技大学科研院副院长。主要研究方向为雷达运动目标检测、雷达稀疏成像技术等。

E-mail: zhushengqi8@163.com

廖桂生(1963–)，男，广西人，博士，教授。1992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，西安电子科技大学电子工程学院院长。主要研究方向为雷达系统技术与阵列处理、雷达稀疏成像处理等。

E-mail: liaogs@xidian.edu.cn

张玉洪(1958–)，男，江苏人，博士，教授。1988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特聘教授。主要研究方向为阵列信号处理、微波遥感与成像、信号建模与仿真、波形分集技术等。

E-mail: yuhzhang@xidian.edu.cn