频控阵雷达空距频聚焦信号处理方法

陈小龙* 陈宝欣 黄 勇 薛永华 关 键
(海军航空大学 烟台 264001)

摘 要：针对复杂环境下对低可观测运动目标探测的迫切需求，该文在系统回顾近几年频控阵雷达国内外发展现状、频控阵雷达阵列结构设计及波束形成、距离和角度的联合估计等技术的基础上，提出了基于空距频聚焦的频控阵雷达信号新方法。充分利用频控阵雷达提供的发射波形自由度、阵元位置自由度、波束方位与距离相关性以及凝视观测的特点，即在空间(角度)、距离和频率(多普勒)的灵活自由度和能量集性，实现空-距-频聚焦和联合参数估计。仿真分析表明该方法具有提高复杂环境下雷达微弱动目标检测和参数估计的潜力，在杂波和干扰抑制、动目标精细化处理等方面有广阔的应用前景。

关键词：频控阵雷达；空距频聚焦(SRDF)；低可观测目标；动目标检测；杂波抑制；高分辨稀疏表示
中图分类号：TN957.51 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2018)02-0183-11
DOI: 10.12000/JR18018

引用格式：陈小龙, 陈宝欣, 黄勇, 等. 频控阵雷达空距频聚焦信号处理方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 183–193. DOI: 10.12000/JR18018.

Reference format: Chen Xiaolong, Chen Baoxin, Huang Yong, *et al.*. Frequency diverse array radar signal processing via Space-Range-Doppler Focus (SRDF) method[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 183–193. DOI: 10.12000/JR18018.

Frequency Diverse Array Radar Signal Processing via Space-Range-Doppler Focus (SRDF) Method

Chen Xiaolong Chen Baoxin Huang Yong Xue Yonghua Guan Jian
(*Naval Aviation University*, *Yantai* 264001, *China*)

Abstract: To meet the urgent demand of low-observable moving target detection in complex environments, a novel method of Frequency Diverse Array (FDA) radar signal processing method based on Space-Rang-Doppler Focusing (SRDF) is proposed in this paper. The current development status of the FDA radar, the design of the array structure, beamforming, and joint estimation of distance and angle are systematically reviewed. The extra degrees of freedom provided by FDA radar are fully utilizsed, which include the Degrees Of Freedom (DOFs) of the transmitted waveform, the location of array elements, correlation of beam azimuth and distance, and the long dwell time, which are also the DOFs in joint spatial (angle), distance, and frequency (Doppler) dimensions. Simulation results show that the proposed method has the potential of improving target detection and parameter estimation for weak moving targets in complex environments and has broad application prospects in clutter and interference suppression, moving target refinement, etc..

Key words: Frequency Diverse Array (FDA) radar; Space-Range-Doppler Focus (SRDF); Low-observable target; Moving target detection; Clutter suppression; High-resolution sparse representation

收稿日期：2018-03-01；改回日期：2018-04-13；网络出版：2018-04-27
*通信作者： 陈小龙 cxlcxl1209@163.com
基金项目：国家自然科学基金(61501487, U1633122, 61471382, 61531020)，国防科技基金(2102024)，山东省高校科研发展计划(J17KB139)，“泰山学者”和中国科协“青年人才托举工程”(YESS20160115)专项经费
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501487, U1633122, 61471382, 61531020), National Defense Science Foundation (2102024), Scientific Research Development of Shandong (J17KB139), Special Funds of Taishan Scholars of Shandong and Young Elite Scientist Sponsorship Program of CAST (YESS20160115)

1 引言

复杂背景下低可观测动目标探测技术是制约雷达探测性能关键技术之一，也是世界性难题[1,2]，迫切需要研究新的雷达体制和雷达技术以适应复杂环境和目标带来的挑战。对于“微弱目标”和“低可观测目标”以及复杂、动态的背景环境，雷达还需要进一步拓展观测空间的维度，以提供更多的信号处理自由度[3]。进而要求雷达能够提供灵活自由度、更高的参数估计能力以及自适应的工作模式。多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达在信号波形和阵列配置上的灵活性能够为复杂且动态背景下的信号处理提供更大的自由度[4]；同时，其宽发窄收的凝视观测方式可有效降低对雷达系统动态范围的要求、延长目标观测时间、提高速度分辨力，从而有利于积累目标能量和抑制杂波。然而，MIMO雷达也有其固有的缺陷：在每一扫描快拍内，波束指向在距离向是恒定的，也就是说波束指向与距离是无关的。但是在某些应用中，例如距离相关性干扰或杂波抑制应用，常常又期望阵列波束在同一快拍内能够以相同的角度指向不同的距离，这就需要波束的指向能够随距离的变化而变化。

近年来，频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)雷达(中文译为频控阵)引起了国内外学者的广泛关注[5]，其在天线阵列的不同阵元上采用不同的发射频率，间隔很小的频偏(频偏远远小于其载频)，能够产生与距离相关的波束方向图，即阵列天线的方向图是距离相关性的。2006年，美国空军研究实验室Paul Antonik和英国伦敦大学Hugh D. Griffiths教授在国际雷达年会首次提出了频控阵雷达的概念[5,6]。后来，美国海军实验室、堪萨斯大学、土耳其中东技术大学、巴基斯坦国际伊斯兰大学等单位相继开展了研究[7–11]。2007年，Secme分析了频控阵天线在距离向和方位角上的周期调制特性[12]，Baker等人使用4个频率合成器控制4个微带天线，分析了频控阵的波束方向图。2009年，Higgins研究了连续调频波在频控阵波束方向图上的应用，并分析了其模糊函数[8]。2010年，Jones提出了平面结构的频控阵，并提出了相应的接收机原理[13]。2011年，Sebt在IEEE雷达会议上提出频控阵雷达在提高目标识别方面的巨大优势。2015年，Basit将频控阵应用到认知雷达中，选择合适的频率偏移实现了功率的最大化[14]。Khan采用log递增的频偏在空间得到不连续的频控阵方向图，并提出采用时变的频偏来解决时间与距离参数的耦合问题[15]。2017年，《IEEE Journal of Selected Topics In Signal Processing》出版了《时/频调制阵列信号处理》专刊[16–20]，集中报道了频控阵雷达在阵列优化、波束形成、参数估计、SAR成像等方面的进展。2017年，IEEE国际雷达年会设置了频控阵系统专题，引起了专家学者的高度关注。国内在此方面虽较国外起步较晚，但近几年取得了飞快的进步，电子科技大学、西安电子科大、浙江大学、清华大学、海军航空大学等科研机构在射频隐身、干扰抑制、阵列结构及方向图分析等方面结合频控阵开展了一系列的理论和仿真方面的研究[11,20–24]。理论研究表明，频控阵在抗干扰、空时自适应处理、SAR成像和动目标检测方面都表现出优异的性能。由此可见频控阵已成为国内外的一大热点研究内容。

由于频控阵的距离-角度相关性，很难被直接用做接收阵列。所以，频控阵一般采用连续波频控阵或与MIMO技术相结合来实现波束形成和接收信号处理。本文结合目前国内外频控阵雷达信号处理领域的研究进展，重点从理论和应用两个层面进行了归纳总结，从MIMO雷达信号处理与挑战入手，系统回顾了近几年频控阵雷达国内外发展现状、频控阵雷达阵列结构设计及波束形成以及距离和角度的联合估计等技术，然后基于频控阵雷达在空间-距离-频率域的信号模型，提出了基于空距频聚焦(Space-Range-Doppler Focus, SRDF)的频控阵雷达信号处理新方法，并进行了初步仿真分析。

2 MIMO阵列雷达信号处理与挑战

MIMO阵列雷达在波形设计、参数估计、目标检测等广泛的应用前景，其在信号波形和阵元位置上的灵活性能够为复杂且动态背景下的信号处理提供更大的自由度，同时，其宽发窄收的凝视观测方式可有效降低雷达系统的动态范围，延长目标观测时间，提高速度分辨力，从而有利于积累目标能量和抑制杂波。因此，MIMO阵列雷达能够提高雷达在强杂波背景下的微弱目标探测性能。目前，国内外关于MIMO阵列雷达目标检测技术的研究主要包括如下两个方面。

2.1 波形设计与阵列优化配置

一方面，利用MIMO阵列雷达波形分集及阵列配置提供的自由度提高雷达区分杂波与目标的能力。MIMO阵列雷达每个发射阵元的波形均可控制，收发阵元间距不拘泥于发射电磁波的半波长，这使得MIMO阵列雷达在波形设计、发射能量管理、空间波束形成、阵列配置等方面有更大的灵活性，因而在微弱目标检测、杂波抑制、抗目标方向性衰落等方面相比传统相控阵雷达有着明显的优势。

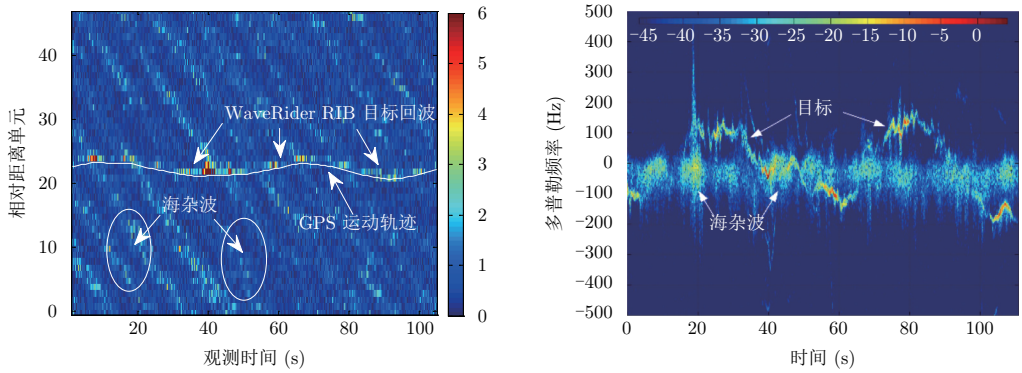
对于以杂波抑制为目的的波形设计问题，Li Ying[25]研究了动态波形与GLRT检测器的联合优化设计问题。Deng Hai等[26]研究了以杂波抑制为目的MIMO雷达波形优化设计问题，分析发射波形为随机初相正交信号的MIMO雷达杂波抑制性能。对于以目标检测为目的的波形设计问题，Friedlander[27]推导了以目标和杂波统计特性及发射波形为参数的MIMO雷达检测器和信干噪比表达式。Naghibi等[28]研究了杂波背景下扩展目标MIMO雷达波形设计问题，提出了基于最小化MMSE估计器输出估计误差的波形设计方法。

MIMO雷达阵列配置涉及收发天线单元布放、发射能量分配等问题。Rabideau[29]从雷达系统造价成本的角度研究了MIMO阵列雷达的布阵方式，分别针对无孔径约束和有孔径约束这两种条件研究了阵元数量的优化问题，并得到以下结论：在无孔径约束条件下，当接收阵元数约为发射阵元数的两倍时，MIMO阵列雷达系统成本最小；而在有孔径约束条件下，MIMO阵列雷达系统的成本与许多因素有关。另外，林肯实验室的Bliss, Forsythe等[30]从雷达探测性能的角度研究了MIMO阵列雷达的布阵方式。作者所在雷达目标探测课题组从2008年开始MIMO雷达系统多维信号检测方面的研究[31–35]，提出了高斯背景和复合高斯背景中MIMO雷达系统多维信号检测技术；2015年，又利用MIMO阵列雷达体制开展海上微弱目标检测技术研究，提出了多种MIMO雷达波形设计和检测方法。

2.2 利用凝视观测的长时间积累检测

基于长时间观测数据的目标检测技术一般可分为两类，一类是针对目标能量的长时间积累检测技术，包括相参积累检测技术和进行非相参积累的检测前跟踪技术。另一类是基于目标信号有无条件下长时间能量起伏差异特征提取的目标检测技术。由于正交信号MIMO雷达形成的是低增益的宽发射波束，因此需要延长积累时间增加目标的能量，获得检测所需的信杂噪比。然而，随着观测时间的延长，运动目标回波包络容易出现跨距离单元的现象，并且直接相参积累(即FFT处理)可能会导致目标能量在多普勒平面扩散，产生距离和多普勒走动，从而限制了长时间相参积累的性能，如图1所示。因此，在未知目标运动参数的情况下，如何通过距离走动校正和多普勒补偿来延长有效积累时间是MIMO雷达长时间相参积累成为关键技术之一[36–44]。

当目标径向速度在观测时间里近似为匀速时，运动补偿主要是解决距离走动问题。目前主要采用距离拉伸联合时频分析方法、速度分段方法、频分包络移位补偿方法和时域包络插值补偿方法来校正目标的距离走动。Radon傅里叶变换(Radon Fourier Transform, RFT)方法在距离-慢时间2维平面中利用离散傅里叶变换沿目标运动参数给出的观测值轨迹进行积分，实现目标能量的长时间相参积累[36,42]。在只考虑多普勒扩散而不考虑包络走动的情况中，通常研究较多的是目标具有恒定径向加速度的情况。此时，目标回波在慢时间维是一个线性调频信号，可采用Wigner-Hough变换[45]、Radon-ambiguity变换[46]、chirplet变换[47]、分数阶傅里叶变换(FRFT)[48]等时频分析方法对其进行能量积累。当目标发生复杂机动而不能用简单的匀速和匀加速建模时，目标检测问题变得更加复杂，一般需要采用时频分布并联合其它方法对其进行检测，且难以实现目标能量的相参积累。为此，研究人员从对目标机动信息(加速度和急动度)的利用以及算法实时性角度出发，提出了多种长时间相参积累方法，适用于驻留模式和MIMO雷达凝视模式下的机动目标检测[38–41,49,50]。



(a) 距离-时间图　(b) 目标单元时频分析

(a) Range-line versus time plot　(b) Time-frequency spectrum of target's returns

图 1 机动目标雷达回波特性

Fig. 1 Characteristics of maneuvering target's returns

综上，MIMO雷达因其具有丰富的发射波形自由度、长时间凝视观测等优势，具有改善雷达探测性能的能力，但MIMO雷达不能区分统一角度不同距离的目标，即难以实现距离和方位的联合估计。

3 频控阵MIMO雷达发展现状及趋势

3.1 频控阵MIMO雷达阵列结构设计及波束形成

MIMO雷达的发射端不具有频控阵雷达的高增益特性，导致其对弱目标信号的检测性能比较差，则可应用频控阵的原理和技术提高频控阵MIMO雷达的发射增益，进而提高其探测和目标参数估计的性能。同时，由于频控阵的距离-角度相关性，很难被直接用做接收阵列，所以频控阵一般与MIMO技术相结合来实现参数估计和波束形成。目前，该领域研究尚处在理论研究阶段，需要突破多项关键技术，但因其具有诸多优势，引起了国内外雷达专家学者的浓厚兴趣。2009年，Sammartino提出了一种基于频控阵的双站雷达系统，其主要应用背景为低截获电子侦察，并进而将频率和波形复用应用到MIMO雷达，提出了一种基于频控阵的MIMO雷达技术[51]。2014年，王文钦提出使用频控阵子阵MIMO的方式估计信号的来波方向。2015年，Khan等人将log频偏应用到频控阵MIMO雷达中，实现了空间中特定位置的波束能量集中分布，而且还可以控制波束方向图的宽度[52]。2015年，陈慧在频控阵MIMO雷达中采用稀疏重建的方法对目标进行定位，并与传统的MUSIC算法作了比较，结果显示应用稀疏重建的频控阵更有优势，估计参数的性能更高[53]。高宽栋等人研究了频偏误差对频控阵MIMO波束及参数估计性能的影响，给出了确定性频率偏移误差导致的波束方向图频移关系式[54]。作者研究了脉冲波形时间约束条件下的频控阵波束方向图，指出了在空间中形成稳定的点(面)波束，实现能量聚焦的前提条件[55]。如何根据应用场景和目标探测的需要选择合适的解耦合频偏是目前需要深入研究的问题。

3.2 频控阵MIMO雷达距离-角度联合参数估计

频控阵雷达的阵列因子具有距离依赖性，其发射波束图是距离、角度和时间耦合的[12]，因此，频控阵雷达的阵列流形(导向矢量)也是与距离、角度和时间相关的，能够通过导向矢量同时估计目标的距离、角度2维参数，对两者的联合参数估计引起了学者的浓厚兴趣。早期的探索频控阵参数估计方法如双脉冲法[56]，通过分别发送两个脉冲定位目标，第1个不带频偏的回波用于侧向，第2个带有频偏的脉冲用于测距，或者基于子阵的定位方法[57]。但这些方法未考虑导向矢量的时变性，且未充分发挥频控阵联合角度、距离探测的优势。目前，关于频控阵雷达的联合参数估计方法仍处于探索阶段，比较实际的信号模型按工作方式可分为两种：基于连续波体制[19,20]和基于FDA-MIMO脉冲体制的信号模型[58]。连续波体制的信号模型是通过在每个阵元施加带通滤波器，从而得到类似MIMO虚拟阵列。其阵列流形相较于相控阵，增加了一个与距离相关的导向矢量，同时消掉了时间耦合。清华大学Liu Yimin等人基于此提出了随机频控阵的概念，通过在每个阵元施加随机的频偏达到解耦的目的，然后提出了基于匹配滤波和稀疏表示的联合角度、距离估计方法[20]。Li Jingjing等人分析了频偏排列与无模糊定位的关系[59]。Qin Si等人提出了基于互质阵和互质频偏的频控阵提高了系统的自由度用于多目标定位，定位方法采用贝叶斯压缩感知[19]。对于FDA-MIMO雷达，通过MIMO发射正交波形也可实现解耦和，最终的信号模型与连续波的类似。Xiong J等分析了FDA-MIMO定位的克拉美罗限以及MUSIC算法的性能[58]。总地来说，基于压缩感知框架的稀疏恢复方法和MUSIC等方法需要较为准确地知道目标的数量，即信号稀疏度，这在实际应用中很难做到。综上，频控阵MIMO雷达不仅具有相控阵和MIMO雷达的全部优点，而且能弥补相控阵雷达和MIMO雷达波束指向不具有距离依赖性的缺点。

频控阵雷达能够对目标的距离和方位角进行2维联合估计，有利于区分杂波背景和动目标，在杂波抑制、运动目标检测、参数估计以及射频隐身等方面具有较大的应用潜力。然而，频控阵雷达信号处理和目标检测方面的研究多针对静止目标，对于运动目标，其多普勒出现时变特性，使得能量发散，如何充分利用频控阵雷达的空间、时间和频率资源，实现空间(方位)-距离(快时间)-频率(慢时间)聚焦处理，提高雷达运动目标检测的性能，亟需深入研究。

4 频控阵雷达空距频聚焦(SRDF)理论与方法

4.1 SRDF处理架构

频控阵雷达也发射相参信号，只是经过附加的频偏控制后辐射出去的信号频率不同，其主要特点是其阵列因子具有距离依赖性，即当频偏固定时，波束指向随距离变化而变化，具有距离相关性；而当距离固定时，波束指向随频偏变化而变化，具有频偏相关性，因此能够在空间中实现距离和方位的

联合估计，这是传统相控阵雷达难以达到的。结合长时间的凝视观测方式，能够极大提高回波信号的多普勒分辨率，从而具备空(方位)-距(距离)-频(多普勒)3维聚焦(SRDF)处理的能力，进一步提高回波信杂比，获得目标的精细化特征，其处理流程架构如图2所示。频控阵雷达通过SRDF处理，完成信号的多维联合相参积累，获得理想的SCR增益。换言之，SRDF处理可将常规雷达信号处理的脉冲压缩、测角和多普勒滤波等多个级联处理环节整合，在实现运动目标检测的同时实现目标参数的高精度测量。频控阵发射波束的去耦处理也是对频控阵的发射波束方向图进行方位和距离的聚焦处理。

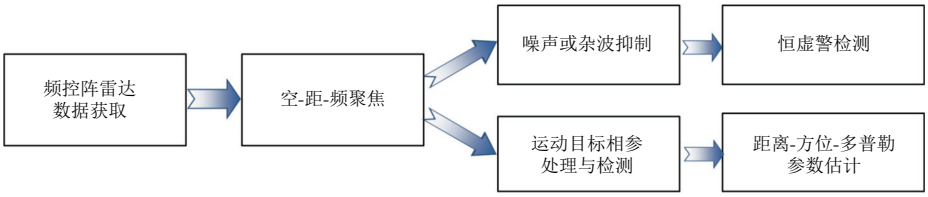


图 2 频控阵雷达空-距-频聚焦信号处理流程架构

Fig. 2 Signal processing flow of space-range-Doppler Focus method for FDA radar

4.2 SRDF理论模型

频控阵雷达和相控阵雷达最大的不同是，其相邻阵元的载波频率存在较小频率增量。考虑M个发射阵元的均匀线阵，阵元间距为d, T_{p}为脉冲持续时间，如图3所示。

则第m个阵元发射的信号为：

$$s_m(t)=w_m\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_m t},\ m=0,\cdots,M-1,\ t\in[0,\ T_{\mathrm{p}}] \tag{1}$$

其中，$f_m=f_0+\Delta f_m$, $\Delta f_m=(m-1)\Delta f$, f_0为载频，Δf为远小于雷达工作载频的频率增量，w_m为发射阵元权重。则对于远场任意距离-方位点(r,θ)处的目标，阵列接收到的信号为：

$$S(t;r,\theta)=\sum_{n=0}^{M-1}w_m^*s_m(t-\tau_m),\ t\in\left[\frac{r}{c},\ \frac{r}{c}+T_{\mathrm{p}}\right] \tag{2}$$

式中，$\tau_m=r_m/c$表示第m个阵元发射信号的延迟，c为光速，$r_m=r-md\sin\theta$代表目标雷达视线距离。基于发射窄带信号假设，则式(2)可近似改写为：

$$\begin{aligned}S(t;r,\theta)=&\sum_{n=0}^{M-1}w_m^*\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_0+\Delta f_m)\left(t-\frac{r-md\sin\theta}{c}\right)}\\ \approx&\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_0(t-r/c)}\sum_{n=0}^{M-1}w_m^*\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\Delta f_m(t-r/c)}\\ &\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0md\sin\theta/c}\end{aligned} \tag{3}$$

位置(r,θ)处的阵列因子可表示为：

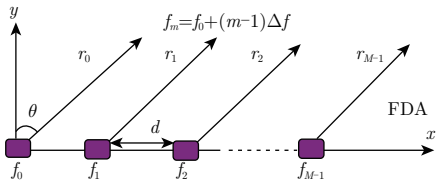


图 3 频控阵雷达的发射阵列示意图

Fig. 3 Transmit array of FDA radar

$$\mathrm{AF}(t;r,\theta)=\sum_{n=0}^{M-1}w_m^*\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\Delta f_m(t-r/c)}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_0md\sin\theta/c} \tag{4}$$

由式(4)可知，频控阵雷达天线方向图具有距离依赖性，其距离和角度是耦合的。

对于一点目标(r,θ)，则在接收端，第n个阵元接收到的第m个阵元发射的信号可表示为：

$$\begin{aligned}y_{m,n}(r,\theta)=&\alpha(r,\theta)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi\Delta f_m r/c}\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi md/\lambda\sin\theta}\\ &\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi nd/\lambda\sin\theta}+n_{m,n}+c_{m,n}\end{aligned} \tag{5}$$

其中，$\alpha(r,\theta)$为目标散射系数，$n_{m,n}$为加性噪声，$c_{m,n}$为杂波。则经过匹配滤波，全部接收阵元的信号写成矢量形式表示为[60]：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}=&\alpha(r,\theta)\left[\boldsymbol{a}_{\mathrm{R}}(r)\odot\boldsymbol{a}_{\mathrm{t}}(\theta)\right]\otimes\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\theta)+\boldsymbol{n}+\boldsymbol{c}\\ \triangleq&\alpha(r,\theta)\boldsymbol{a}(r,\theta)+\boldsymbol{n}+\boldsymbol{c}\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$\odot$和$\otimes$分别表示Hadamard积和Kronecker积运算。T为转置运算。

发射阵列导向矢量为：

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{t}}(\theta)=\left[1\quad\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi df_0/c\sin\theta}\quad\cdots\quad\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(M-1)df_0/c\sin\theta}\right]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

接收阵列导向矢量为：

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{r}}(\theta)=\left[1\quad\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi df_0/c\sin\theta}\quad\cdots\quad\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(N-1)df_0/c\sin\theta}\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

距离维阵列导向矢量为：

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{R}}(r)=\left[\mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi\Delta f_0 r/c}\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi\Delta f_1 r/c}\ \cdots\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi\Delta f_{M-1} r/c}\right]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

接收信号经过混频、采样、滤波后，其距离、发射导向与接收导向矢量三者关系如式(8)所示，因此频控阵有着天然的解耦能力，进而，可通过在接收端采用MUSIC、稀疏重构等算法即可实现目标定位。

将频控阵信号模型扩展至多普勒域，考虑发射L个脉冲，对于一速度v_r的运动目标，考虑目标多普勒，则频控阵雷达运动目标的信号模型可表示为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y}_{\mathrm{mov}} &= \alpha(r,\theta,f_{\mathrm{d}})\left[\boldsymbol{a}_{\mathrm{d}}(f_{\mathrm{d}})\otimes\boldsymbol{a}(r,\theta)\right]+\boldsymbol{n}+\boldsymbol{c}\\ &= \mu\boldsymbol{\kappa}_{\mathrm{mov}}(r,\theta,f_{\mathrm{d}})+\boldsymbol{n}+\boldsymbol{c}\end{aligned}\tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{a}_{\mathrm{d}}(f_{\mathrm{d}})=\left[\begin{array}{cccc}1 & \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{d}}T_{\mathrm{p}}} & \cdots & \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi(L-1)f_{\mathrm{d}}T_{\mathrm{p}}}\end{array}\right]^{\mathrm{T}}$为慢时间$t_m$下的多普勒导向矢量，空-距-频聚焦矢量$\boldsymbol{\kappa}_{\mathrm{mov}}(r,\theta,f_{\mathrm{d}})=\boldsymbol{a}_{\mathrm{d}}(f_{\mathrm{d}})\otimes\boldsymbol{a}(r,\theta)$, f_{d}为多普勒频率，根据目标运动状态不同，可描述多类型运动目标，如目标以速度v_0匀速运动时，$f_{\mathrm{d}}=2v_0/\lambda$；当目标做机动，具有加速度$a_s$时，此时$f_{\mathrm{d}}=2(v_0+a_st_m)/\lambda$；当目标做振荡和转动时，多普勒具有周期调频特性。

4.3 基于SRDF的动目标检测方法

由式(10)可知，$\boldsymbol{\kappa}_{\mathrm{mov}}(r,\theta,f_{\mathrm{d}})$本质为空距频聚焦因子，因此，对于运动目标，利用频控阵的距离-方位联合估计特性以及慢时间的长时间自由度，能够实现空(方位)-距(距离，即快时间)-频(多普勒，慢时间)的联合处理，能够进一步提高低可观测动目标的SNR/SCR，同时利用估计得到的不同运动类型目标的运动参数，可实现对运动状态的精细化描述。SRDF处理可将常规雷达信号处理的波束形成、脉冲压缩和多普勒滤波等多个级联的相参处理环节整合。基于SRDF的频控阵雷达动目标检测和估计方法流程图如图4所示。

4.4 仿真及分析

根据式(10)所述的频控阵雷达空距频信号处理模型，进行仿真分析。图5–图8分别给出了单目标(匀速和匀加速运动目标)和多目标条件下的频控阵

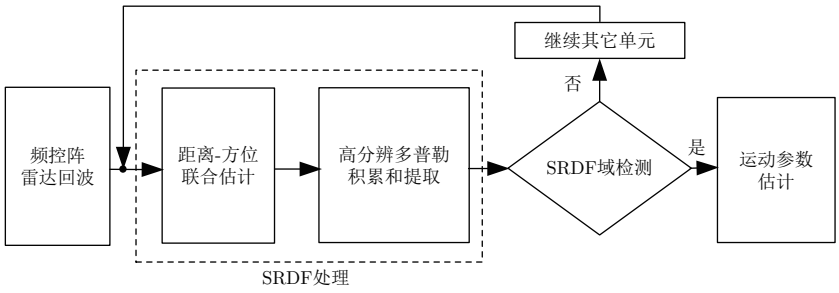


图 4 基于SRDF的频控阵雷达动目标检测和估计方法流程图

Fig. 4 Flowchart of moving target detection and estimation based on SRDF for FDA radar

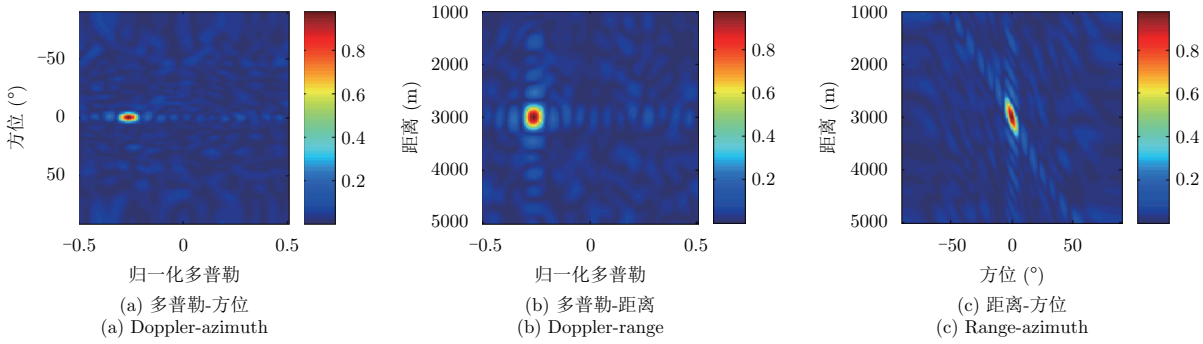


图 5 噪声背景下匀速运动目标的频控阵雷达空间谱(SNR=0 dB)

Fig. 5 Spatial spectrum of uniform motion targets in a noise background for FDA radar (SNR=0 dB)

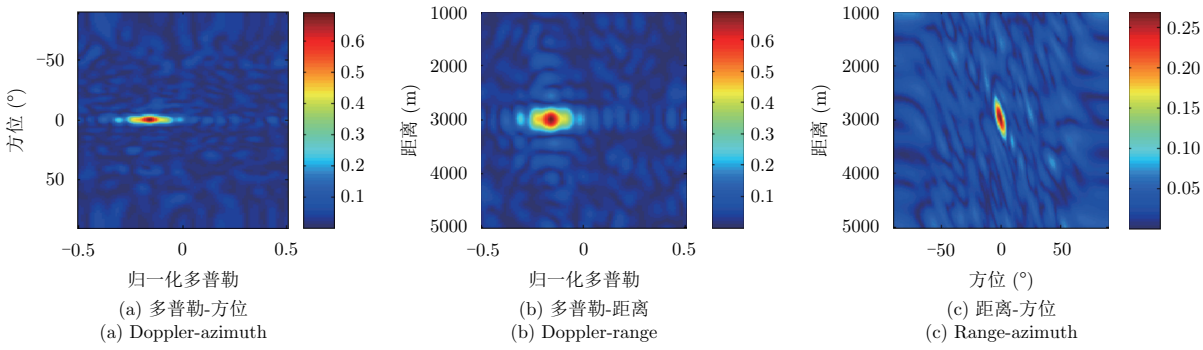


图 6 噪声背景下匀加速运动目标的频控阵雷达空间谱(SNR=0 dB)

Fig. 6 Spatial spectrum of moving targets with constant acceleration in a noise background for FDA radar (SNR=0 dB)

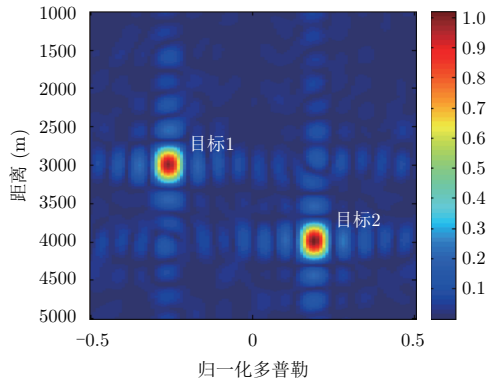


图 7 相同方位角，不同距离和多普勒的多目标频控阵雷达空间谱 (θ_1=θ_2=0°, r_1=2990 m, r_2=3990 m, f_{d1}=–0.26, f_{d2}=0.19)

Fig. 7 Spatial spectrum of multiple targets with the same azimuth, different range and Doppler (θ_1=θ_2=0°, r_1=2990 m, r_2=3990 m, f_{d1}=–0.26, f_{d2}=0.19)

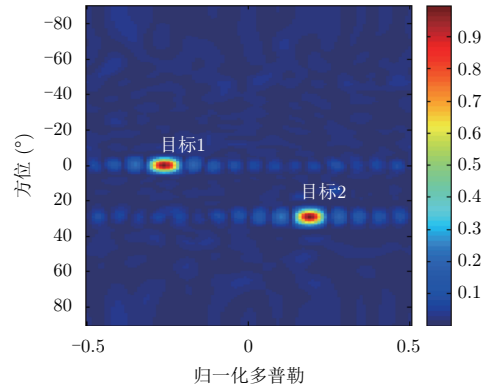


图 8 相同距离，不同方位角和多普勒的多目标频控阵雷达空间谱 (r_1=r_2=2990 m, θ_1=0°, θ_2=29°, f_{d1}=–0.26, f_{d2}=0.19)

Fig. 8 Spatial spectrum of multiple targets with the same range, different azimuth and Doppler (r_1=r_2=2990 m, θ_1=0°, θ_2=29°, f_{d1}=–0.26, f_{d2}=0.19)

雷达空间谱，包括方位-多普勒谱、距离-多普勒谱，其中横坐标为归一化的多普勒。仿真参数设置如下：发射和接收阵元数M=N=16，积累脉冲数L=101，发射载频f_0=1 GHz，频偏Δf=30 kHz, SNR=0 dB，采样频率f_s=1000 Hz，匀速运动目标速度为v_0=–39 m/s(–260 Hz)，匀加速运动目标初速度v_0=–39 m/s(–260 Hz)、加速度a_s=2 m/s^2(13.4 Hz/s)。可以看出：(1)区别于静止目标，运动目标的频控阵雷达空间谱具有多普勒特征，与运动速度相对应，如图5(a)和图6(a)；(2)利用频控阵雷达能够实现空距频的3维联合处理；(3)非匀速运动目标的多普勒谱发散，跨越多个多普勒单元，不利于目标能量的积累和运动参数的估计；(4)利用频控阵雷达空间谱能够在方位-距离-多普勒多维度区分多目标分量。

此外，为了实现高分辨的多普勒特征提取和估计，可采用稀疏时频分析(Sparse Time-Frequency Distribution, STFD)的方法[61,62]，如稀疏傅里叶变换(Sparse FT, SFT)、稀疏FRFT(Sparse FRFT, SFRFT)[63]等，提高参数估计精度的同时降低运算量。

5　总结与展望

基于频控阵雷达信号处理领域现状的分析，本文提出的空距频聚焦(SRDF)处理理论可充分利用频控阵雷达提供的发射波形自由度、阵元位置自由度、波束方位与距离相关性以及长驻留时间的特点，即在空间(角度)、距离和频率(多普勒)的灵活自由度和能量集性，提高复杂环境下雷达微弱目标检测和参数估计能力。围绕SRDF理论和方法，未来重点的研究方向包括：

第一，目标机动以及微动使得多普勒产生调制以及时变特点，但在频控阵雷达体制下不同类型的运动目标的多普勒特性尚不明确，下一步将重点进行频控阵雷达信号建模研究，深入分析其空距频域特性，为后续的信号处理奠定基础。

第二，杂波和动目标的频控阵雷达空间谱特性将有明显差异，具有在距离和方位向区分的潜力，这是相控阵和MIMO雷达难以实现的。研究复杂杂波和干扰环境下的频控阵雷达空距频特性，通过分析杂波、干扰和目标在发射-接收-多普勒3维空间中的分布特性，进一步提出杂波和干扰抑制新方法。

第三，定量分析雷达参数、工作模式、阵元配置、目标运动、探测环境对频控阵雷达探测性能的综合影响，寻找目标检测、参数估计、发射波束形成、目标运动特性和环境信息智能反馈之间的融合优化方法，从而为频控阵雷达认知探测奠定基础。

第四，频控阵雷达极大扩展了信号维度，但也极大增加了运算量，需进一步研究SRDF的快速算法，为频控阵雷达SRDF方法的工程应用和推广奠定基础。

第五，频控阵雷达SRDF处理是常规雷达信号处理的脉冲压缩、测角和多普勒滤波等多个级联处理环节整合，通过SRDF能够实现运动目标的高精度参数估计，提高对运动目标的精细化描述能力，进而为研究目标识别新方法提供新的途径。

第六，目前，实现频控阵雷达的途径主要有连续波和脉冲两种体制，连续波体制具有发射功率低、低截获、方位自动扫描、长时间凝视等优点，且有利于接收端阵元波形频谱的分离；而脉冲体制采用正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)也可以实现波形频谱的分离[64]，可根据具体应用需求选择相应的体制。

参 考 文 献

[1] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测动目标精细化处理及应用[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 19–27.
Chen Xiao-long, Guan Jian, Huang Yong, *et al*.. Radar refined processing and its applications for low-observable moving target[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(20): 19–27.

[2] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 30–38.
Chen Xiao-long, Guan Jian, Huang Yong, *et al*.. Radar low-observable target detection[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(11): 30–38.

[3] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 空时频检测前聚焦雷达信号处理方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 129–141. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14023.
Xu Jia, Peng Ying-ning, Xia Xiang-gen, *et al*.. Radar signal processing method of space-time-frequency focus-before-detects[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 129–141. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14023.

[4] Haimovich A M, Blum R S, and Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116–129. DOI: 10.1109/MSP.2008.4408448.

[5] Antonik P, Wicks M C, Griffiths H D, *et al*.. Range dependent beamforming using element level waveform diversity[C]. Proceedings of Waveform Diversity and Design Conference, LasVegas, 2006.

[6] Zhang Z and Kayama H. Dynamic space-frequency-division multiple-access over frequency-selective slow-fading channels[C]. Proceedings of the IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, Melbourne, Australia, 2006: 2119–2124.

[7] 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.

[8] Higgins T and Blunt S D. Analysis of range-angle coupled beamforming with frequency-diverse chirps[C]. Proceedings of 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, FL, USA, 2009: 140–144.

[9] Huang J J. Frequency diversity array: Theory and design[D]. [Ph.D. dissertation], University College London, 2010.

[10] Weber J, Oruklu E, and Saniie J. FPGA-based configurable frequency-diverse ultrasonic target-detection system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(3): 871–879. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030214.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Jones A M and Rigling B D. Frequency diverse array radar receiver architectures[C]. Proceedings of 2012 International Waveform Diversity & Design Conference, Kauai, HI, USA, 2012: 211–217.

[14] Basit A, Qureshi I M, Khan W, *et al*.. Cognitive frequency offset calculation for frequency diverse array radar[C]. Proceedings of the 2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan, 2015: 641–645.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Li Y. Dynamic waveform design for sensor systems with novel estimation of sensing environment characteristics[D]. Arizona State University, 2010.

[26] Deng H and Himed B. Optimum waveform design and clutter rejection processing for MIMO radar[C]. Proceedings of the 2010 18th European Signal Processing Conference, Aalborg, Denmark, 2010: 1249–1251.

[27] Friedlander B. Waveform design for MIMO radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1227–1238. DOI: 10.1109/TAES.2007.4383615.

[28] Naghibi T and Behnia F. MIMO radar waveform design in the presence of clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 770–781. DOI: 10.1109/TAES.2011.5751224.

[29] Rabideau D J. MIMO radar aperture optimization[Z]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, 2011.

[30] Bliss D W, Forsythe K W, and Richmond C D. MIMO radar: Joint array and waveform optimization[C]. Proceedings of 2007 Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2007: 207–211.

[31] Xue Y H, Li X Y, and Sun Y L. Knowledge-aided target detection in sea clutter for distributed MIMO sky-wave radar[C]. Proceedings of IET International Radar Conference 2015, Hangzhou, China, 2015: 1–5.

[32] 李秀友, 薛永华, 黄勇, 等. 基于不确定集的稳健MIMO雷达波形设计算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2445–2452. DOI: 10.11999/JEIT151425.
Li Xiu-you, Xue Yong-hua, Huang Yong, *et al*.. Robust MIMO radar waveform design algorithm based on uncertainty set[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(10): 2445–2452. DOI: 10.11999/JEIT151425.

[33] 关键, 黄勇, 何友. 基于自适应脉冲压缩-Capon滤波器的MIMO阵列雷达CFAR检测器[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 54(11): 2411–2424.
Guan Jian, Huang Yong, and He You. A CFAR detector for MIMO array radar based on adaptive pulse compression-capon filter[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(11): 2411–2424.

[34] 关键, 黄勇, 何友. MIMO阵列雷达检测器的性能分析[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2107–2111.
Guan Jian, Huang Yong, and He You. Performance analysis of the detector for MIMO array radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2107–2111.

[35] 关键, 黄勇. Gauss色噪声中MIMO分布孔径雷达检测性能分析[J]. 中国科学 F辑: 信息科学, 2009, 52(9): 1688–1696.
Guan Jian and Huang Yong. Detection performance analysis for MIMO radar with distributed apertures in Gaussian colored noise[J]. *Science in China Series F-Information Sciences*, 2009, 52(9): 1688–1696.

[36] Xu J, Zhou X, Qian L C, *et al*.. Hybrid integration for highly maneuvering radar target detection based on generalized radon-Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(5): 2554–2561. DOI: 10.1109/TAES.2016.150076.

[37] Huang P H, Liao G S, Yang Z W, *et al*.. Long-time coherent integration for weak maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation based on keystone transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(15): 4013–4026. DOI: 10.1109/TSP.2016.2558161.

[38] Chen X L, Guan J, Liu N B, *et al*.. Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(4): 939–953. DOI: 10.1109/TSP.2013.2297682.

[39] Chen X L, Guan J, Huang Y, *et al*.. Radon-linear canonical ambiguity function-based detection and estimation method for marine target with micromotion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2225–2240. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2358456.

[40] Chen X L, Guan J, Liu N B, *et al*.. Detection of a low observable sea-surface target with micromotion via the radon-linear canonical transform[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1225–1229. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2290024.

[41] Chen X L, Huang Y, Liu N B, *et al*.. Radon-fractional ambiguity function-based detection method of low-observable maneuvering target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(2): 815–833. DOI: 10.1109/TAES.2014.130791.

[42] Xu J, Yu J, Peng Y N, *et al*.. Radon-Fourier transform for radar target detection, I: Generalized Doppler filter bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186–1202. DOI: 10.1109/TAES.2011.5751251.

[43] Li X L, Cui G L, Kong L J, *et al*.. Fast non-searching method for maneuvering target detection and motion

parameters estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(9): 2232–2244. DOI: 10.1109/TSP.2016.2515066.

[44] Zheng J B, Su T, Zhu W T, *et al*.. ISAR imaging of nonuniformly rotating target based on a fast parameter estimation algorithm of cubic phase signal[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 4727–4740. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2408350.

[45] Wang H W, Fan X Y, Chen Y, *et al*.. Wigner-Hough transform based on slice's entropy and its application to multi-LFM signal detection[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(4): 634–642.

[46] Yang L S, Zhang Z J, and Guo F Y. Fast algorithm for Radon-ambiguity transform[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(3): 553–559. DOI: 10.1049/iet-rsn.2015.0297.

[47] Wang Y, Zhao B, and Jiang Y C. Inverse synthetic aperture radar imaging of targets with complex motion based on cubic Chirplet decomposition[J]. *IET Signal Processing*, 2015, 9(5): 419–429. DOI: 10.1049/iet-spr.2014.0086.

[48] Tao R, Li Y L, and Wang Y. Short-time fractional Fourier transform and its applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(5): 2568–2580. DOI: 10.1109/TSP.2009.2028095.

[49] Chen X L, Wang G Q, Dong Y L, *et al*.. Sea clutter suppression and micromotion marine target detection via Radon-linear canonical ambiguity function[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(6): 622–631. DOI: 10.1049/iet-rsn.2014.0318.

[50] Chen X L, Guan J, Li X Y, *et al*.. Effective coherent integration method for marine target with micromotion via phase differentiation and Radon-Lv's distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(9): 1284–1295. DOI: 10.1049/iet-rsn.2015.0100.

[51] 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. DOI: 10.1109/WDDC.2009.4800336.

[52] 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.

[53] Chen H and Shao H Z. Sparse reconstruction based target localization with frequency diverse array MIMO radar[C]. Proceedings of 2015 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing, Chengdu, China, 2015: 94–98.

[54] 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.

[55] 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.

[56] 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.

[57] 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.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 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.

[61] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达动目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239–251. DOI: 10.12000/JR16110.
Chen Xiao-long, Guan Jian, He You, *et al*.. High-resolution sparse representation and its applications in radar moving target detection[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 239–251. DOI: 10.12000/JR16110.

[62] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 雷达动目标短时稀疏分数阶傅里叶变换域检测方法[J]. 电子学报, 2017, 45(12): 3030–3036.
Chen Xiao-long, Guan Jian, Yu Xiao-han, *et al*.. Radar detection for moving target in short-time sparse fractional Fourier transform domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(12): 3030–3036.

[63] Liu S S, Shan T, Tao R, *et al*.. Sparse discrete fractional Fourier transform and its applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(24): 6582–6595. DOI: 10.1109/TSP.2014.2366719.

[64] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种超分辨OFDM雷达通信一体化设计方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 425–433. DOI: 10.11999/JEIT150320.
Liu Yong-jun, Liao Gui-sheng, Yang Zhi-wei, *et al*.. A

super-resolution design method for integration of OFDM radar and communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 425–433. DOI: 10.11999/JEIT150320.

作 者 简 介

陈小龙(1985–)，男，山东烟台人，讲师，博士。研究领域包括雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等。入选中国科协“青年人才托举工程”，中国电子学会青年科学家俱乐部成员，获中国电子学会优秀博士学位论文奖，第十九届中国专利优秀奖，中国电子学会科技进步三等奖。

E-mail: cxlcxl1209@163.com

陈宝欣(1990–)，男，山东栖霞人，博士在读。主要研究方向包括阵列信号处理、雷达目标检测等。

E-mail: b.x.chen@foxmail.com

关　键(1968–)，男，辽宁锦州人，教授，博士生导师。主要研究方向包括雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合。获国家科技进步二等奖1项、军队科技进步一等奖2项，山东省技术发明一等奖1项；“百千万人才工程”国家级人选，入选教育部新世纪优秀人才支持计划。

E-mail: guanjian_68@163.com