#### doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.07.020

**引用格式:**张希会,王文钦. 频控阵特征及应用前景综述[J]. 电讯技术,2016,56(7):826-832. [ZHANG Xihui, WANG Wenqin. Properties and application prospects of frequency diverse array: an overview [J]. Telecommunication Engineering,2016,56(7):826-832. ]

# 频控阵特征及应用前景综述\*

# 张希会\*\*1,王文钦2

(1. 中国西南电子技术研究所,成都 610036;2. 电子科技大学 通信与信息工程学院,成都 611731)

摘 要:频控阵是近年来提出的一种新体制阵列技术。与传统相控阵不同的是,频控阵通过在不同 通道附加很小的频偏,使其波束图在远场成为随位置、角度和时间变化的函数。频控阵这种新波束 的特征产生许多新的功能,具有很多独特的应用优势和广阔的发展应用前景。首先介绍了频控阵发 展历程和基本原理,然后分析了频控阵技术实现难点,最后指出了频控阵可能的应用和发展方向。 关键词:频控阵;相控阵;波束图;射频隐身;频率编码;认知雷达;应用前景

中图分类号:TN958 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)07-0826-07

# Properties and Application Prospects of Frequency Diverse Array: an Overview

ZHANG Xihui<sup>1</sup>, WANG Wenqin<sup>2</sup>

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;
2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Frequency diverse array (FDA) is a new array technique proposed in recent years. Unlike conventional phased array, frequency diverse array uses a very small frequency shift across its array elements to provide a beam pattern which focuses direction changes as a function of the range, angle and time in the far-field. This new beam property offers many promising advantages for communication, radar, interference countermeasure applications and so on. This paper introduces the development progress and principle of frequency diverse array, analyzes the existing technical challenges of frequency diverse array and finally discusses the promising applications and future developments.

Key words: frequency diverse array; phased array; beam pattern; radio frequency stealth; frequency encoding; cognitive radar; application prospect

#### 1 引 言

频控阵(Frequency Diverse Array, FDA)技术来 源于相控阵(Phased Array, PA)技术,可以看作是后 者的发展和延续。相控阵技术最早可以追溯到19 世纪,伦敦大学的马可尼在1901年第一次应用阵列 天线到无线电报通信技术中<sup>[1]</sup>, Mark 8 雷达第一次 引入相控阵技术应用到火控系统的方位扫描技术 中。到第二次世界大战,美国、英国和德国已经广泛 应用相控阵技术<sup>[2]</sup>。随着时间推移,支撑相控阵的 相关技术得到全面发展,固定波束的阵列演变成电 子扫描阵列,机械移相器已被替换为电子移相器,真 空管发射机已经让位给固态发射机,而辐射元件已 经被印制电路板代替。然而,自马可尼在大西洋进 行无线电通信实验以来,相控阵的基本理论却几无

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-01-25;修回日期:2016-05-04 Received date:2016-01-25;Revised date:2016-05-04

<sup>\*\*</sup> 通信作者:seaharm\_yeah@163.com Corresponding author:seaharm\_yeah@163.com

变化。

相控阵的优势之一在于可自由地实现波束的空 间扫描,因而广泛地应用于目标检测与成像应用。 通常相控阵每个阵元发射(接收)的是同一信号,通 过在每个阵元的输出端接入移相器进行波束方向控 制,调整移相器的相移量便可实现波束的空域扫描。 此外,还可以通过改变雷达系统的工作频率来实现 波束扫描,即频率扫描天线。近些年出现的自适应 阵列信号处理 (Space Time Adaptive Processing. STAP)技术和认知处理雷达对雷达接收端系统性能 都有极大的提高,通过波形分集技术改变发射波形 可更好地适应环境干扰下的目标匹配。认知雷达利 用目标和干扰环境的已知信息用于改变对应的数 据、参数和算法,可提高目标检测和跟踪效果<sup>[3-4]</sup>。 随着自适应技术的不断发展,IEEE 通过的波形分集 的新定义中,包括了天线波束图、时域、频域、编码域 以及极化域的自适应性。

1970年, Kaye 和 George 第一次设计出多输入 多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)的通 信系统,通过多路独立信道减少衰落影响,从而提高 信道容量和改善误码率。20世纪80年代,Winters 探讨空间分集信号的最佳组合,以减轻信道间干扰 和瑞利衰落<sup>[5-7]</sup>。90年代以后,包括贝尔实验室在 内的众多科研机构对 MIMO 通信进行深入的研究。 Fishler 和 Robey 第一次将 MIMO 技术引入到雷达应 用中,可降低雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)波动引起的闪烁效应,改善多径检测性能,提 高分辨率,更适宜自适应阵列技术、抗干扰技术发挥 以及可提供更灵活的波束图设计。

然而,相控阵、频率扫描及 MIMO 雷达都存在一 个缺点:在每一扫描快拍内,波束指向在距离向上是 恒定的,也就是说波束指向与距离是无关的,但某些 应用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。频控阵技术的出现为解决此问题 带来了希望。本文介绍了频控阵技术的发展状况, 分析了其原理和基本特征,总结了其研究难点,指出 了可能的应用方向,以期为相关技术人员提供参考。

### 2 频控阵技术的发展状况

2006年,美国学者 Antonik 和 Wicks 首次提出 频控阵概念<sup>[8]</sup>,并申请了美国专利。频控阵概念提 出以来,已引起信号处理界学者广泛关注,并推动了

频控阵相关理论和技术的进一步发展[9-10]。由于这 种阵列天线具有距离依赖性方向图,该概念一经提 出便在美国国防研究机构引起广泛关注。Higgins 和 Blunt 分析指出频控阵发射波束会出现距离和方 位角响应的耦合问题。Huang 等人<sup>[11]</sup>分析了频控 阵的周期性波束扫描特性。Cetintepe 和 Demir<sup>[12]</sup>对 频控阵雷达的多径特性作了仿真分析。Khan 和 Qureshi 等人<sup>[13]</sup>通过调整阵元频偏设计了只依赖于 距离的发射波束形成方法。Eker 等人<sup>[14]</sup>设计了适 用于线性调频连续波的频控阵天线。西安电子科技 大学的廖桂生等人[15]提出了一种针对频控阵的接 收波束形成方法,并应用于解决空时信号处理中的 距离模糊问题。Wang 等人<sup>[16]</sup>提出一种针对极化敏 感频控阵的多域滤波方法。Faroog 和 Temple 将频 控阵应用于提高雷达成像时的方位向分辨率。Baizert 和 Hale<sup>[17]</sup>提出一种基于频控阵的前视雷达地 面运动目标指示方法。Sammartino 和 Baker<sup>[18]</sup>提出 基于频控阵的 MIMO 雷达技术。Zhuang 和 Liu 将频 控阵应用于抑制分布式 MIMO 雷达发射-接收波束 栅瓣的影响。Wang<sup>[19]</sup>对频控阵阵列流形和模糊特 性的分析结果表明,频控阵能比相控阵分辨更多目 标,并进而提出结合频控阵和 MIMO 雷达优势的 Phased-MIMO 雷达波束形成方法<sup>[20-21]</sup>和子阵列设 计方法<sup>[22-23]</sup>。

FDA 直译应为频率复用阵列,但王文钦<sup>[6-10]</sup>在 多次的相关学术报告中与相关专家讨论后一致认为 这种新体制阵列从其工作原理上讲译作频控阵更为 贴切。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。因此,频控阵仍然属于相控阵 范畴,译作频控阵更能体现其工作原理,也与相控阵 相对应。由于频控阵具有良好的应用前景, IEEE Journal of Selected Topics on Signal Processing 组织了 专刊 Time/Frequency Modulated Array Signal Processing,预计2017年初正式出版。频控阵在雷达中的 一个重要应用潜力是对目标距离和方位角进行二维 联合估计。对此,王文钦和 Khan<sup>[24]</sup>分别提出基于 双脉冲的频控阵雷达目标距离-方位角联合估计方 法,进而王文钦和西安电子科技大学的许京伟博 士<sup>[25]</sup>分别提出基于频控阵-MIMO 雷达的距离和方 位角联合估计方法。同时,受近年来兴起的认知雷 达研究热潮影响,王文钦<sup>[26]</sup>和 Saeed<sup>[27]</sup>分别提出具

· 827 ·

有环境感知和陷波认知的认知频控阵雷达概念技 术。因为上述文献都是将频控阵用于雷达发射端,王 文钦提出了一种基于延迟线的嵌套频控阵接收机设 计方法,并对其目标检测和估计性能作了理论分析。 此外,英国的 Yuan Ding 博士<sup>[28]</sup>还提出一种基于频控 阵的无线保密通信方法,可在不降低通信误码率的前 提下,大大降低通信信号被截获破译的概率。

### 3 频控阵原理及基本特征

#### 3.1 频控阵基本构成和推导

频控阵通过新方式的波束形成和控制为阵列天 线设计增添了新的思路。频控制基本构成是将阵列 各阵元辐射的连续波的频率依次叠加一段几赫兹的 小频移。小频移会导致与常规相控阵显著不同的特 征,波束图方向成为随距离、角度和时间的函数,而 后者波束指向方向在远场与时间和距离无关时间。 频控阵发射波形示意图如图1所示。

波甩	én - WWW	WWW	WWW	* * *	WWW
	: +++	* * *	* * *	* * *	***
波甩	\$4 <b>-</b> WWM		WWW	* * *	WWW
波甩	≝3 <b>-</b> ₩₩	WW	WW	* * *	WW ·
波甩	≶2• <b>F</b> MM	W	$\mathcal{M}$	* * *	WM ]
波刑		$\sim$	$\sim$	+ + +	$\sim$
	脉冲1	脉冲2	脉冲3	•••	脉冲m

图 1 频控阵发射频率随着通道线性增加 Fig. 1 FDA wave with frequency increasing linearly across elements

对于远场目标,目标到第一个阵元路程形成的 相位差可表示为

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} R_1 = \frac{2\pi f_1}{c} R_{1\circ}$$
 (1)

式中: $\lambda_1, f_1, R_1$ 分别表示信号波长、频率、目标到第一阵元距离。

类似地,目标到第二阵元路程形成的相位差可 表示为

$$\psi_{2} = \frac{2\pi}{\lambda_{2}}R_{2} = \frac{2\pi f_{2}}{c}R_{2} = \frac{2\pi (f_{1} + \Delta f) (R_{1} - d\sin\theta)}{c} = \frac{2\pi f_{1}}{c}R_{1} - \frac{2\pi f_{1} d\sin\theta}{c} + \frac{2\pi R_{1} \Delta f}{c} - \frac{2\pi \Delta f d\sin\theta}{c} \circ$$
(2)

由于第一阵元和第二阵元间发射信号频率只有 微小偏移,近似满足相干原理下,可得出两阵元发射 信号到目标形成的相位差为

$$\Delta \psi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{2\pi f_1 d\sin\theta}{c} - \frac{2\pi R_1 \Delta f}{c} + \frac{2\pi \Delta f d\sin\theta}{c}$$
(3)

式中:第一项即为传统相控阵阵元间相位偏移;第二 项和第三项则是由于阵元间频率不同带来的相位偏 移,其中第二项表明相位偏移随距离 *R*<sub>1</sub> 和频偏 Δ*f* 变化,成为频控阵最重要的特征,即随角度扫描的频 控阵波束图有距离依赖性。

除了频率移动被同时加到阵元间外,频控阵其 他方面类似于频率扫描天线,即频率随时间变化。 式(3)若通过传统频率扫描,则对应角度θ时传统 相控阵相位偏移为

$$\Delta \psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta' = \frac{2\pi f d}{c} \sin \theta', \qquad (4)$$

反解 θ'有

$$\theta' = \arcsin\left[\frac{f_1 \sin\theta}{f} - \frac{R_1 \Delta f}{fd} + \frac{\Delta f \sin\theta}{f}\right]_{\circ}$$
(5)

式(5)表明,传统频率扫描的方位角 $\theta$ '可以通 过频控阵下阵元间频偏的控制间接实现。 $\theta$ =0时,

$$\theta' = \arcsin\left[-\frac{2R_1\Delta f}{c}\right]_{\circ} \tag{6}$$

通过式(6)对距离求偏导,有

$$\frac{\partial \theta'}{\partial R_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{-2R_1\Delta f}{c}\right)^2}} \cdot \left(-\frac{2\Delta f}{c}\right)_\circ \tag{7}$$

图2显示了不同距离对应的角度随距离变 化率。



Fig. 2 Rate of change in apparent angle as a function of range for the FDA

· 828 ·

#### 3.2 频控阵时变信号

设频控阵第*i* 阵元的发射信号为  $x_i(t) = \cos(2\pi f_i t)$ , (8)

而N个阵元总输出波形为

$$x(t) = \sum_{i=1}^{N} x_i = \sum_{i=1}^{N} \cos(2\pi f_i t) \,. \tag{9}$$

由于式(9)为等间隔单载频信号的叠加,频谱 很容易表示为冲击串形式,如图3所示。



图 3 频控阵信号频谱 Fig. 3 Spectrum of the FDA waveform

通过冲击串方式,频谱表达为

$$X(f) = \left\{ \operatorname{rect}\left(\frac{f - f_{\mathrm{m}}}{W}\right) + \operatorname{rect}\left(\frac{f + f_{\mathrm{m}}}{W}\right) \right\} \cdot \operatorname{rep}_{\Delta f} \{\delta(f)\}_{\circ}$$
(10)

式中: $W = N\Delta f$ ; rep<sub> $\Delta f$ </sub> { $\delta(f)$  } =  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - n\Delta f)$ ;  $f_m$  表示 脉冲串中心频率。

通过门函数和冲激函数傅里叶变换,可以反解 时域信号为

$$\begin{aligned} x(t) &= \left[ |W|\operatorname{sinc}(Wt) e^{j2\pi f_{\mathrm{m}}t} + |W|\operatorname{sinc}(Wt) e^{-j2\pi f_{\mathrm{m}}t} \right] \otimes \\ &\left| \frac{1}{\Delta f} \right| \cdot \operatorname{rep}_{\frac{1}{\Delta f}} \left\{ \delta(t) \right\} = \\ &2 \left| \frac{W}{\Delta f} \right| \left( \operatorname{sinc}(Wt) \cos(2\pi f_{\mathrm{m}}t) \right) \otimes \\ &\left| \frac{1}{\Delta f} \right| \cdot \operatorname{rep}_{\frac{1}{\Delta f}} \left\{ \delta(t) \right\} = \\ &2N\operatorname{rep}_{\frac{1}{\Delta f}} \left\{ \operatorname{sinc}(N\Delta ft) \cos(2\pi f_{\mathrm{m}}t) \right\}_{\circ} \end{aligned}$$
(11)

式中: ※表示卷积。其时域图如图4所示。



图 4 阵信号时域波形 Fig. 4 Time waveform of the FDA

从图 4 中可以看出,频控阵时域合成波形表现 为正弦函数受辛格函数调幅,时域波形周期为1/Δf。

#### 3.3 频控阵波束图的传播性质

根据自由空间的麦克斯韦传输特性,对于均匀 孔径阵列,电场 *E* 可表示为

$$E = \frac{1}{R_0} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j[(\omega_0 + n\Delta\omega)t - (k_0 + n\Delta k)(R_0 - nd\sin\theta]} = \frac{1}{R_0} e^{j[(\omega_0 t - k_0 R_0)]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j[n(\Delta\omega t + k_0 d\sin\theta - \Delta k R_0 + n\Delta k d\sin\theta)]}$$
(12)

式中: $R_0$ 、 $\omega_0$ 、N、d、 $\theta$ 分别表示第一个阵元与目标距 离、第一阵元发射信号的角频率、阵元个数、相邻阵 元间距以及目标方位; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ ; $\Delta k = 2\pi/\Delta \lambda$ 。

当阵列与目标距离远大于阵列尺寸时,即满 足远场条件  $R_0 >> nd\sin\theta$  时,令  $\psi = \Delta\omega t + k_0 d\sin\theta - \Delta k R_0$ ,有

$$E = \frac{1}{R_0} e^{j[(\omega_0 t - k_0 R_0)]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn\psi} = \frac{1}{R_0} e^{j[(\omega_0 t - k_0 R_0)]} \cdot \frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \circ$$
(13)

利用部分求和公式,频控阵电场强度可表示为

$$|E| = \frac{1}{R_0} \left| \frac{\sin\left(\frac{N\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right|, \qquad (14)$$

则最大电场条件为 $\psi = \Delta \omega t + k_0 d \sin \theta - \Delta k R_0 = 2\pi m, m$ 为整数。反解 t 为

$$t = \frac{1}{\Delta f} m + \frac{R_0}{c} - \frac{(d/\lambda_0)\sin\theta}{\Delta f}, \qquad (15)$$

即时间周期为  $1/\Delta f_{\circ}$  反解  $R_0$  为

$$R_0 = \left(-\frac{c}{\Delta f}\right)m + ct - \frac{\left(d/\lambda_0\right)\sin\theta}{\Delta f},\qquad(16)$$

即距离周期为 c/Δf。反解角度为

$$\sin\theta = \left(\frac{\lambda}{d}\right)m + \frac{\Delta f}{f_0 d}(R_0 - ct), \qquad (17)$$

即距离周期为 $\lambda/d_{\circ}$ 波束图可随时间改变角度,根据 $\psi = \Delta \omega t + k_0 d \sin \theta - \Delta k R_0 = 2\pi m$ ,对时间求导<sup>[29]</sup>,可得出扫描角度随时间变化率:

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{-\Delta\omega}{k_0 d\cos\theta^{\circ}} \tag{18}$$

利用 
$$\Delta \omega = 2\pi f \, \pi k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0},$$
上式可改写为  
$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \frac{-\Delta f}{(d/\lambda_0)\cos\theta^\circ}$$
(19)

· 829 ·

当  $\Delta f = 100 \text{ Hz} \sqrt{d/\lambda_0} = 0.45 \text{ 时}, 角度随时间变化 如图 5 所示。$ 



图 5  $d/\lambda_0 = 0.45$  时角度随时间变化率 Fig. 5 Rate of angle changing with time when  $d/\lambda_0 = 0.45$ 

线性频控阵,其均匀加权的发射波束辐射图 F 可表示为

$$F(\theta, r) = \sum_{m=1}^{M} e^{j \left\{ -\frac{2\pi f_0 (m-1)d\sin\theta}{c_0} - \frac{2\pi (m-1)^2 \Delta f d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi (m-1)\Delta f \cdot r}{c_0} \right\}} \approx \sum_{m=1}^{M} e^{j \left\{ -\frac{2\pi f_0 (m-1)d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi (m-1)\Delta f \cdot r}{c_0} \right\}} = \frac{e^{jM \left\{ -\frac{2\pi f_0 d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi \Delta f \cdot r}{c_0} \right\}}}{e^{j \left\{ -\frac{2\pi f_0 d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi \Delta f \cdot r}{c_0} \right\}}} \cdot \frac{\sin \left\{ M \left[ -\frac{2\pi f_0 d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi \Delta f \cdot r}{c_0} \right] \right\}}{\sin \left\{ -\frac{2\pi f_0 d\sin\theta}{c_0} + \frac{2\pi \Delta f \cdot r}{c_0} \right\}} \right\}$$
(20)

频控阵波束图与传统相控阵波束图三维比较如 图 6 和图 7 所示,从图形上可以看出两者波束图有 重大区别,前者具有路径"弯曲"的性质。而图 8 则 显示了波束指向随着频偏变化呈现明显偏离的 现象。



图 6 频控阵发射归一化波束图 Fig. 6 Transmit normalized beam pattern of the FDA



图 7 相控阵的发射归一化波束图 Fig. 7 Transmit normalized beam pattern of the phased array



图 8 当距离固定时波束指向随频偏变化 而变化( $f_0 = 10$  GHz, N = 12) Fig. 8 Beam pointing variation with frequency offset in the fixed distance( $f_0 = 10$  GHz, N = 12)

## 4 频控阵技术研究难点

频控阵波束具有距离依赖性,但这种距离依赖 性波束又在方位角向上存在耦合问题,不能利用线 阵频控阵无模糊地实现目标的到达距离和到达方位 角二维联合估计,采用控制频率编码和波束形成是 解决频控阵距离向和方位角向耦合问题的重要途 径,也将是频控阵研究的必然发展方向。当前遇到 的难点主要有:

(1)如何对频控阵波束的距离向和方位角向耦 合进行去耦处理;

(2)如何对频控阵的控制频率进行编码,又如 何对其进行波束形成,尤其对多目标应用背景;

(3)如何对频控阵作接收自适应波束形成处 理,需要解决其协方差矩阵的有效获取问题,由于其 距离依赖性,不能套用常规相控阵的方法;

(4)如何利用无源频控阵实现目标的到达距离 和方位角二维联合估计及目标定位;

(5)如何将线阵频控阵推广到面阵频控阵,并 实现目标三维定位; (6)如何建立关于新体制频控阵的新概念、新理论和新方法,为这种阵列实现目标参数二维(甚至三维)估计提供较好的理论模型和求解算法支持;

(7)频控阵进行目标多维参数估计时如果进行 多维搜索的话,其计算复杂度势必较大,需要解决算 法的简化问题。

### 5 主要可能的应用方向

由于频控阵波束表现为时间、距离和方位的函数,这一特性可带来与传统阵列显著不同的特征,许 多领域都可引入这一新特征,可为许多领域带来广泛 的应用基础。主要的应用前景包括以下几个方面:

(1) 雷达目标的距离-方位角联合估计应用

与相控阵阵列因子只与方位角参数有关不同, 频控阵阵列因子不仅与方位角参数有关,也与距离 参数有关,所以一个重要应用潜力是对目标距离和 方位角进行二维参数联合估计,目前也有多篇研究 文献证实这种应用的可行性。

(2)具有自适应环境感知的认知频控阵雷达技术

将频控阵应用于认知雷达,通过自适应更新调整频控阵雷达的频率增量来最大化雷达接收机的输出信噪比和信干比,达到最佳的雷达杂波和干扰抑制效果,则有望实现一种具有环境认知的认知频控 阵雷达,实现杂波和干扰的自适应抑制应用。

(3)射频隐身应用

通过对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, 并通过相位调制降低发射信号的被截获解调概率, 最后在接收端通过波束的相位解码和接收波束形成 恢复综合出高增益的发射阵列方向图,则有望实现 雷达和通信系统的射频隐身应用。

(4)前视探测与成像应用

前视雷达探测与成像具有非常重要的战略意 义,但现有基于相控阵的前视雷达不能解决方位向 图像左右对称模糊问题,而且当前下视雷达面对强 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 束主瓣走动特性和距离依赖特性,有助于分离和抑 制干扰,可以一定程度地抑制距离模糊杂波。

(5)新体制聚束合成孔径雷达成像应用

与相控阵不同,频控阵发射波束具有距离依赖性 自动扫描功能,可对目标点保持更长的驻留扫描时 间,也可实现更高频率的空间搜索扫描功能,所以频 控阵聚束合成孔径雷达,尤其滑动聚束合成孔径雷达,有望实现比传统聚束合成孔径雷达更大的方位向 测绘带宽和更高的合成孔径雷达图像信噪比性能。

(6)新体制 TOPSAR(Terrain Observation by Progressive scans SAR) 成像应用

TOPSAR 成像模式已在德国宇航中心的 Terra-SAR 得到成功验证。实际上,常规 TOPSAR 主要采 用方位多通道技术来提高方位向分辨率,所以利用 频控阵优化设计有效的天线方位扫描方案,有望实 现更高的成像性能。

(7) 定向干扰或定向安全通信应用

Yuan Ding 博士已经证实频控阵的定向安全通 信应用是可行的。另外,频控阵的定点波束形成特 性还可应用于对目标的定向干扰。

### 6 结 论

本文详细介绍了频控阵的概念、发展历程、基本 原理和应用前景,梳理了国内外关于频控阵技术的 相关文献,分析了频控阵在雷达目标的距离-方位 角联合估计、自适应环境感知的认知频控阵雷达技 术、低截获、前视探测与成像、聚束合成孔径雷达、 TOPSAR 成像以及定向干扰或定向安全通信等领域 应用前景。未来关于频控阵技术最需要发展的技术 应该是控制频率编码和复杂抗截获的波束形成。

虽然频控阵技术还面临许多亟待解决的关键技 术难题,随着各国学者对频控阵越来越关注,频控阵 技术将迎来一轮发展高峰。

#### 参考文献:

- BONDYOPADHYAY P K. The first application of array antenna [C]//Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, CA: IEEE, 2000:29-32.
- PAULS T A. Origins of sparse aperture imaging [C]// Proceedings of 2001 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT:IEEE, 2001:1421-1427.
- [3] CAPRARO C T, CAPRARO G T, WEINER D D, et al. Knowledge based map space - time adaptive processing (KBMapSTAP) [J]//Proceedings of 2001 International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology. Las Vegas, NV: IEEE, 2001:1-5.
- [4] MORGAN C, MOYER L. Knowledge base applications to adaptive space-time processing Vol. V: knowledge-based tracker rule book[R]. Rome, NY: US Air Force Research Laboratory, 2001.
- [5] AYTUN A. Frequency diverse array radar [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2010.

- [6] ANTONIK P. An investigation of a frequency diverse array[D]. London: University College London, 2009.
- [7] WANG W Q, SHAO H Z. Range-angle-dependent transmit beampattern synthesis for linear frequency diverse arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(8):4073-4081.
- [8] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Multi -mission, multi-mode waveform diversity [C]//Proceedings of 2006 IEEE Radar Conference. Verona, NY: IEEE, 2006:580-582.
- [9] WANG W Q. Phased-MIMO radar with frequency diversity for range-dependent beamforming[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4):1320-1328.
- WANG W Q, SHAO H Z. Phased-MIMO radar with frequency diversity for improved system flexibility [C]// Proceedings of 2012 IEEE International Signal Processing Communication Computation Conference. Hong Kong: IEEE, 2012:16–19.
- [11] HUANG J, TONG K F, BAKER C. Frequency diverse array with beam scanning feature [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Antennas and Propagation Symposium. San Diego: IEEE, 2008:1-4.
- [12] CETINTEPE C, DEMIR S. Multipath characteristics of frequency diverse arrays over a ground plane [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (7):3567-3574.
- [13] KHAN W, QURESHI I M, SAEED S. Frequency diverse array radar with logarithmically increasing frequency offset[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14):499-502.
- [14] EKER T, DEMIR S, 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.
- [15] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q. Receive beamforming of frequency diverse array radar systems [C]//Proceedings of XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing: IEEE, 2014:1-4.
- [16] WANG Y M, MAO X P, ZHANG J, et al. A multi-domain collaborative filter based on polarization sensitive frequency diverse array[C]//Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference. Cincinati:IEEE,2014:507-511.
- BAIZERT P, HALE T, TEMPLE M, et al. Forward-looking radar GMTI benefits using a linear frequency diverse array
   [J]. Electronic Letters, 2006, 42(22):1311-1312.
- [18] SAMMARTINO P F, BAKER C J, GRIFITHS H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013 (1):201-222.
- [19] WANG Y B, WANG W Q, CHEN H. Linear frequency diverse array manifold geometry and ambiguity analysis
   [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2):984-993.
- [20] WANG W Q. Phased-MIMO radar with frequency diversity for range-dependent beamforming[J]. IEEE Sen-

sors Journal, 2013, 13(4):1320–1328.

- [21] WANG W Q, 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.
- [22] WANG W Q. Subarray-based frequency diverse array for target range-angle estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (4): 3057-3067.
- [23] 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(1):1188-1191.
- [24] LINC H, FANG W H. Joint angle and delay estimation in frequency hopping systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic System, 2013, 49(2):1042-1056.
- [25] OH D, LEE J H. Low-complexity range-azimuth FMCW radar sensor using joint angle and delay estimation without SVD and EVD[J]. IEEE Sensor Journal, 2015, 15 (9):4799-4811.
- [26] FUHRMANN D, BROWNING P, RANGASWAMY M. Signaling strategies for the hybrid MIMO phased-array radar[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(1):66-78.
- [27] XU J, 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.
- [28] WANG W Q. Phased-MIMO radar with frequency diversity for range-dependent beamforming[J]. IEEE Sensor Journal, 2013, 13(4):1320-1328.
- [29] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Multi - mission, multi - mode waveform diversity [C]//Proceedings of 2006 IEEE Radar Conference. Verona, NY: IEEE, 2006:580-582.

### 作者简介:



**张希会**(1979—),男,四川荣县人,2012 年于电子科技大学获博士学位,现为工程师, 主要研究方向为阵列信号处理;

ZHANG Xihui was born in Rongxian, Sichuan Province, in 1979. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2012. He is

now an engineer. His research concerns array signal processing. Email:seaharm\_yeah@163.com

**王文钦**(1979—),男,四川仁寿人,2010年于电子科技 大学获博士学位,现为研究员、博士生导师,主要研究方向为 阵列信号处理。

WANG Wenqin was born in Renshou, Sichuan Province, in 1979. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2010. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns array signal processing.