

## 一种基于非线性调频信号和空域编码的FDA雷达波形设计方法

于雷<sup>①</sup> 何峰\*<sup>①</sup> 董臻<sup>①</sup> 粟毅<sup>①</sup> 张永胜<sup>①</sup> 吴曼青<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

<sup>②</sup>(中国电子科技集团有限公司 北京 100000)

**摘要:** 频率分集阵列(FDA)雷达通过在不同发射阵元间引入微小的载频增量,实现发射方向图在脉冲持续时间内对大尺度空域的均匀连续扫描。然而FDA雷达方向图主瓣的扫描特性,使得其在一个方位角度位置的波束驻留时间缩短,积累带宽减小,从而降低其距离分辨率。针对上述问题该文提出了一种空时域联合的FDA雷达波形设计方法,通过引入阵元间的空域相位编码显著改善了相干FDA雷达的距离分辨率,同时在时域设计一种非线性调频波形获得了更低的距离旁瓣。该文从理论上分析了该方法的有效性,并通过仿真实验证明了该波形设计方法同时具有距离向高分辨和低峰值旁瓣比的优势,具有更好的一维距离向成像性能,并分析了其对高速运动目标的观测能力。

**关键词:** 频率分集阵列; 波形设计; 非线性调频信号; 空域编码; 峰值旁瓣比

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)06-0822-11

DOI: 10.12000/JR21008

**引用格式:** 于雷, 何峰, 董臻, 等. 一种基于非线性调频信号和空域编码的FDA雷达波形设计方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 822-832. doi: 10.12000/JR21008.

**Reference format:** YU Lei, HE Feng, DONG Zhen, *et al.* A waveform design method based on nonlinear frequency modulation and space-coding for coherent frequency diverse array radar[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 822-832. doi: 10.12000/JR21008.

## A Waveform Design Method Based on Nonlinear Frequency Modulation and Space-coding for Coherent Frequency Diverse Array Radar

YU Lei<sup>①</sup> HE Feng\*<sup>①</sup> DONG Zhen<sup>①</sup> SU Yi<sup>①</sup>  
ZHANG Yongsheng<sup>①</sup> WU Manqing<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(College of Electronics Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100000, China)

**Abstract:** A Frequency Diverse Array (FDA) radar achieves the uniform coverage of a large-scale airspace within a pulse duration by introducing a designed carrier frequency increment between adjacent transmitting elements. Unfortunately, the beam scanning property of an FDA radar leads to a reduction in dwell time at certain azimuth direction, which results in the deterioration of the range resolution. To solve this problem, we propose a novel coherent FDA radar waveform in the space-time domain, in which spatial phase encoding is introduced between transmitting elements to significantly improve the range resolution of a coherent FDA radar. A nonlinear frequency modulation signal is also used in the time domain to obtain a low-range Peak to SideLobe Ratio (PSLR). Simulation results verify that the proposed FDA radar waveform design realizes both a low PSLR and high range resolution. Finally, we analyze the Doppler sensitivity of our proposed method for the observation of high-speed moving targets.

**Key words:** Frequency Diverse Array (FDA); Waveform design; Nonlinear frequency modulation; Space-coding; Peak to SideLobe Ratio (PSLR)

收稿日期: 2021-01-26; 改回日期: 2021-03-26; 网络出版: 2021-04-19

\*通信作者: 何峰 hefeng@nudt.edu.cn \*Corresponding Author: HE Feng, hefeng@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771478)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61771478)

责任主编: 朱圣棋 Corresponding Editor: ZHU Shengqi

## 1 引言

在未来的战场环境下，空天目标威胁越来越复杂多变。这就需要雷达系统具备对大尺度空天区域的连续态势感知能力。基于时间分割原理和发射资源预置的观测模式，传统相控阵雷达将难以应付大范围空域内同时、多目标的态势感知任务。频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)通过在发射阵元间引入一个远小于中心频率的载频增量，利用简单的相干波形即可实现对观测空域的大范围观测，与正交多发多收(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达相比，硬件实现难度更低。FDA雷达具有距离-角度-时间三维耦合的发射方向图，因而其信号处理技术也带来了新的应用价值。近年来，随着雷达硬件能力的不断提升、数字阵列雷达的设计自由度不断提高，FDA雷达逐渐成为新体制雷达领域的研究热点之一<sup>[1-13]</sup>。

目前，FDA雷达的相关研究工作主要聚焦在对FDA多维耦合的发射方向图研究和FDA在雷达系统中的应用及其相关的信号处理技术研究。针对FDA雷达的发射方向图，文献[9]从阵列参数配置的角度研究了实现FDA雷达发射方向图距离角度解耦合的条件；文献[11]通过设计一种时域分段的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)波形实现照射角度灵活可控的发射方向图。针对FDA雷达的应用，文献[3]研究了MIMO FDA雷达的距离-角度联合参数估计方法。文献[5]研究了FDA雷达在地面运动目标检测方面的应用。文献[6]研究了FDA雷达在抗主瓣欺骗式干扰方面的能力。

从发射波形的角度，FDA雷达分为相干FDA雷达和MIMO FDA雷达。MIMO FDA雷达与正交MIMO雷达类似，要求发射波形间满足正交性条件。相干FDA雷达与相控阵雷达类似，不同阵元间的发射波形完全相同，仅在阵元间引入载频偏移，从而形成距离-角度-时间三维依赖的导向矢量，使其波束主瓣在方位维连续扫描，实现发射能量在空域的均匀覆盖。相干FDA雷达由于阵元间发射相干波形而降低了其波形设计和硬件实现的难度，同时也具有良好的恒模性。但是FDA雷达的波束扫描特性使得波束在一个方位角度位置的驻留时间大大缩短，当采用频率-时间调制波形作为发射波形时其对应的积累带宽也会降低，从而导致相干FDA雷达的距离向分辨率恶化，理论分析表明：当阵元数增加、波束宽度变窄时，这种分辨率恶化将十分严重<sup>[12]</sup>。文献[13]提出在阵元间引入空域相位编码恢复FDA雷达的距离分辨率，取得了良好的效果，但是该文献中使用LFM信号作为发

射波形，引入空域编码后其距离自相关旁瓣幅度较高，不利于对目标的距离向高分辨率成像(High-Resolution Range Profile, HRRP)。LFM信号脉冲压缩后的高旁瓣特性是由其矩形的频谱形状决定的，而非线性调频(Nonlinear Frequency Modulation, NLFM)信号可以通过改变时间与频率的变化关系设计出具有理想距离旁瓣的信号频谱，在波形设计中具有更高的自由度<sup>[14]</sup>。通过在设计NLFM信号时将信号频谱“削尖”而避免了频域加权带来的信噪比损失。

针对相干FDA雷达的距离向分辨率较差的问题，本文提出了一种空时域联合的波形设计方法。通过阵元间的空域相位加权，改变发射阵列方向图形状，延长了对目标的观测时间，显著提高了FDA雷达对目标的距离向积累带宽，并结合快时间域的NLFM信号设计有效降低了波形的峰值旁瓣比，使其具有更好的距离向一维高分辨率成像性能。本文通过多维模糊函数对设计波形进行了定性、定量评估。仿真实验证明了本文提出的波形设计方法与相干FDA雷达和发射LFM波形并引入空域编码的FDA雷达相比，在显著提高距离向分辨率的同时具有更好的旁瓣性能。同时本文对其多普勒敏感性进行了分析，验证了本文所提波形设计方法对高速目标的观测能力。

## 2 相干FDA雷达模型

### 2.1 FDA雷达的发射方向图

假设FDA雷达的阵列构型为阵元数为 $M$ 的一维均匀线阵(Uniform Linear Array, ULA)，则第 $m$ 个阵元的发射信号载频 $f_m$ 的表达式为

$$f_m = f_0 + (m - 1) \Delta f \quad (1)$$

在与参考阵元距离为 $r_0$ 的目标位置处发射信号的相位延迟 $\varphi_m$ 可以表示为

$$\varphi_m = 2\pi f_m \left( t - \frac{r_m}{c} \right) \quad (2)$$

其中， $r_m$ 表示第 $m$ 个阵元到目标的距离，其表达式为

$$r_m = r_0 + (m - 1) d \sin \theta \quad (3)$$

其中， $d = \lambda/2$ 表示阵元间距， $\lambda$ 为载波波长， $\theta$ 表示目标相对于参考阵元的方位角。在远场假设成立条件下，由式(2)可得第 $m$ 个阵元的延迟相位与参考阵元的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_m = \varphi_m - \varphi_1 &= 2\pi \left( f_m \left( t - \frac{r_m}{c} \right) - f_0 \left( t - \frac{r_0}{c} \right) \right) \\ &\approx 2\pi \left[ (m - 1) \Delta f \cdot t - \frac{(m - 1) f_0 d \sin \theta}{c} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(m - 1) \Delta f \cdot r_0}{c} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)中忽略了与距离延迟无关的二次相位项, 由 $\Delta\varphi_m$ 可得一维线阵FDA雷达的导向矢量为

$$\mathbf{a}_T(\theta, r_0, t) = \left[ 1, \exp\left(-j2\pi\left[\Delta f \cdot t - \frac{f_0 d \sin\theta + \Delta f \cdot r_0}{c}\right]\right), \dots, \exp\left(-j2\pi\left[(M-1)\Delta f \cdot t - \frac{(M-1)(f_0 d \sin\theta + \Delta f \cdot r_0)}{c}\right]\right) \right]^T \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 $\Delta f = 0$ 时FDA雷达完全等价于传统相控阵雷达。由导向矢量可得FDA雷达的发射方向图为

$$\begin{aligned} \text{AF}(\theta, r_0, t) &= \sum_{m=1}^M \exp\{-j\Delta\varphi_m\} \\ &\approx \sum_{m=1}^M \exp\left\{-j2\pi\left[(m-1)\Delta f \cdot t - \frac{f_0(m-1)d \sin\theta}{c} - \frac{(m-1)\Delta f \cdot r_0}{c}\right]\right\} \\ &= \exp\left\{j(M-1)\pi\left(\frac{f_0 d \sin\theta}{c} + \frac{\Delta f \cdot r_0}{c} - \Delta f \cdot t\right)\right\} \cdot \frac{\sin\left[M\pi\left(\frac{\Delta f \cdot r_0}{c} + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \Delta f \cdot t\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\frac{\Delta f \cdot r_0}{c} + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \Delta f \cdot t\right)\right]} \quad (6) \end{aligned}$$

从式(6)可看出FDA雷达的发射方向图是一个距离-角度-时间三维耦合的函数, 可以通过阵列加权来调节发射方向图的波束指向 $\theta_0$ , 此时发射方向图函数表达式为 $\text{AF}(\theta - \theta_0, r, t)$ , 其具有随距离、时间、角度的周期性变化特征<sup>[8]</sup>。本文重点分析 $\text{AF}(\theta, r, t)$ 在快时间的方位扫描特性, 并解释其对距离向分辨率的影响。下面假设目标距离天线参考阵元 $r_0 = 30 \text{ km}$ , 脉冲宽度 $T_p = 5 \mu\text{s}$ , 载频偏移量 $\Delta f = 1/T_p = 200 \text{ kHz}$ , 可得FDA雷达和相控阵雷达的角度-时间二维方向图, 如图1所示。

如图1所示, 脉冲体制的FDA雷达并不是将发射能量持续地汇聚在一个固定距离的“球壳”上, 而是在一个脉冲持续时间内, 其波束依次照射不同的方位角度, 形成连续的空域扫描。图2在极坐标系下画出了 $r_0 = 30 \text{ km}$ 位置上脉内不同瞬时时刻的雷达波束指向, 相当于对沿方位轴对图1(a)在不同

时刻的横向切片, 更加直观地表现了FDA雷达脉内的波束扫描特性。

脉冲体制FDA雷达波束覆盖的角度范围与载频偏移量 $\Delta f$ 有关, 当 $\Delta f = 1/T_p$ 时, 在一个脉冲持续时间内FDA雷达波束可以实现对方位角度 $[-\pi/2, \pi/2]$ 的连续扫描。FDA雷达通过方位向的波束扫描大大提高了其空间侦察监视能力, 但是也使其相比于相控阵雷达具有更短的波束驻留时间。这种“以时间换空间”的策略使得FDA雷达在相同观测角度上的信噪比和积累带宽均小于相控阵雷达。以发射LFM波形的一维均匀线阵的相干FDA雷达为例(本文接下来的论述中提到相干FDA雷达均默认采用一维均匀线阵且以LFM作为发射波形), 分别给出FDA雷达和相控阵雷达的时频关系如图3所示, 其中用黄色短虚线标出了FDA雷达波束的瞬时指向。

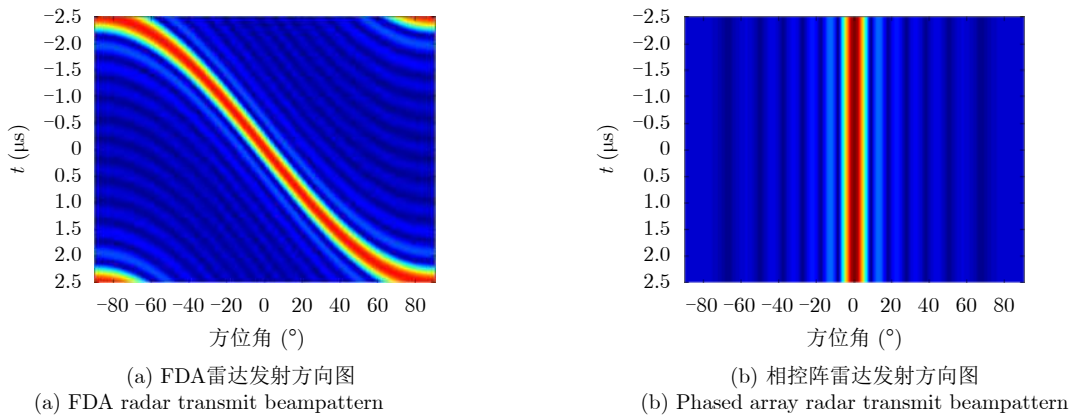


图 1 角度-时间发射方向图对比

Fig. 1 The comparison of time-angle transmit beampatterns

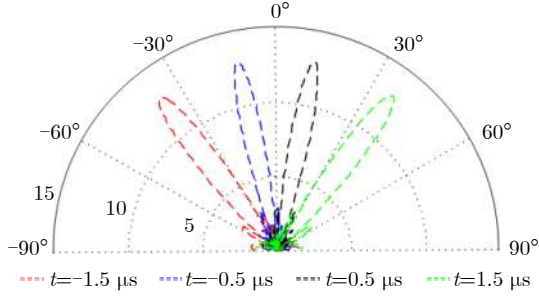


图2 极坐标下脉冲持续时间内不同瞬时时刻FDA雷达的波束指向  
Fig. 2 Beam pointing of FDA radar at different instances within pulse in polar coordinates

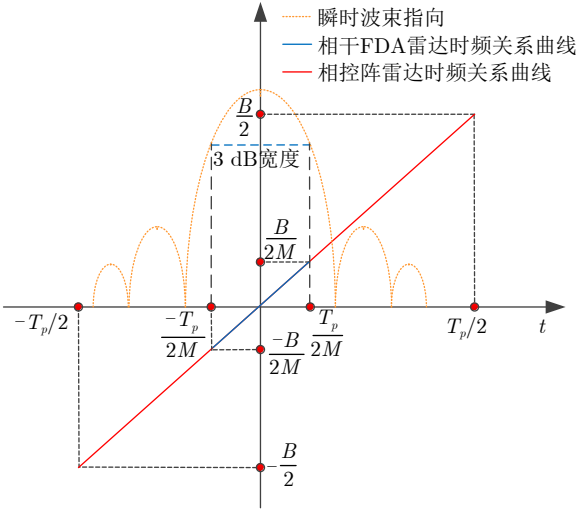


图3 相干FDA雷达(蓝色)和相控阵雷达(红色)的时频关系曲线  
Fig. 3 The time-frequency relationship of the coherent FDA radar (blue) and the phased array radar (red)

由于FDA雷达方向图主瓣在脉冲持续时间内沿方位向连续扫描。因此,如图3所示相干FDA雷达在一个固定方位角度上的波束驻留时间与其波束主瓣的3 dB宽度有关,在一维均匀线阵的情况下,近似等于脉冲宽度 $T_p$ 的 $1/M$ 。因此,如图3所示当发射波形为LFM波形时,相干FDA雷达在相同观测角度上的距离向等效带宽仅为相控阵雷达的 $1/M$ 。相干FDA雷达可以通过延长对目标观测时间的方法有效弥补损失的信噪比,但是距离分辨率的损失很难在多次观测中通过相参积累得到补偿。

## 2.2 相干FDA雷达信号模型

在一维均匀线阵假设下,脉冲相干FDA雷达在方位位置 $\theta$ 处的发射信号模型可以表示为

$$\begin{aligned} s_T(t, \theta) &= \sum_{m=1}^M e^{j2\pi d(m-1)\sin\theta/\lambda} s_m(t) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \sum_{m=1}^M e^{j2\pi d(m-1)\sin\theta/\lambda} e^{j2\pi f_m t} \phi(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $s_m(t)$ 表示第 $m$ 个阵元的发射信号,  $\phi(t)$ 表示基带信号,  $\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_p/2 \\ 0, & |t| > T_p/2 \end{cases}$ 为快时间窗函数。假设收发天线共址,发射阵元数为 $M$ ,接收阵元数为 $N$ ,则发射信号经距离 $r$ 、方位角 $\theta$ 处的目标反射在第 $n$ 个接收阵元处得到的接收信号可以表示为

$$s_{R,n}(t - \tau, \theta) = e^{j2\pi(n-1)d\sin\theta/\lambda} \xi_T s_T(t - \tau, \theta) + v_n(t) \quad (8)$$

其中,  $\tau = 2r_0/c$ 表示参考阵元到目标的双程延迟,  $\xi_T$ 表示目标回波的复系数,  $v_n(t)$ 表示第 $n$ 路信号的接收噪声。由式(8)可得一维的回波信号,将 $N$ 个接收通道的接收信号写成回波信号矩阵的形式如下

$$\mathbf{S}_R(t - \tau, \theta) = \mathbf{a}_R(\theta) \xi_T s_T(t - \tau, \theta) + \mathbf{v}(t) \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{a}_R(\theta) = [1, e^{j2\pi d\sin\theta/\lambda}, \dots, e^{j2\pi(N-1)d\sin\theta/\lambda}]^T$ 为接收导向矢量,  $\mathbf{v}(t)$ 为接收噪声矢量。在接收端可以通过设计阵列加权矢量 $\mathbf{w}_R(\theta') = \mathbf{a}_R^H(\theta')$ 实现接收波束形成,获得在方位位置 $\theta'$ 的高增益,其中上标H表示共轭转置。设计如式(10)所示的空-时域联合的多维匹配滤波器,可以同时实现接收方向图形成和距离向脉冲压缩。

$$\mathbf{H}(t, \theta') = \mathbf{a}_R(\theta') s_T^*(t, \theta) \quad (10)$$

利用式(10)给出的多维匹配滤波器对接收信号 $\mathbf{S}_R(t - \tau)$ 进行匹配接收得到如式(11)所示的接收信号。

$$Y(t - \tau, \theta, \theta') = \xi_T \mathbf{a}_R^H(\theta') \mathbf{a}_R(\theta) s_T^*(t, \theta) \cdot s_T(t - \tau, \theta) + v'(t) \quad (11)$$

如式(11)所示,多维匹配接收信号的强度与距离延时 $\tau$ 、目标方位角 $\theta$ 以及接收端波束形成对应的角度 $\theta'$ 有关,此外目标运动引入的多普勒频率 $f_d$ 也会影响匹配接收的性能。传统的距离-多普勒模糊函数无法在角度维评价发射、接收波束形成对多维匹配接收信号的影响。因此,在式(11)的基础上忽略系数 $\xi_T$ 和噪声 $v'(t)$ ,引入多普勒频率 $f_d$ 并沿快时间积分得到如式(12)所示的多维模糊函数,对FDA雷达的多维匹配接收信号加以评估。

$$\begin{aligned} |\chi(\tau, f_d, \theta, \theta')|^2 &= \left| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{j\frac{2\pi d(m-1)\sin\theta}{\lambda}} e^{-j\frac{2\pi d(n-1)\sin\theta'}{\lambda}} \right. \\ &\quad \left. \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} s_m(t) s_n^*(t - \tau) \cdot e^{j2\pi f_d t} dt \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $s_m(t)$ 和 $s_n(t)$ 分别表示第 $m$ 和第 $n$ 个阵元的发射信号,  $\theta$ 表示目标的方位位置,  $\theta'$ 表示接收波束形成指向的角度。式(12)的前半部分评价了阵列雷



达发射和接收波束形成对接收信号增益的影响,后半部分的积分项则类似于传统模糊函数评价了发射波形的自相关性能和多普勒容忍性,整体上它等价于利用式(10)所示的多维匹配滤波器对式(9)所示的回波信号矩阵做匹配接收。多维模糊函数的不同降维表达式可以分别用来评价阵列雷达信号的距离分辨率、多普勒容忍性和空域覆盖能力,是对雷达系统和发射波形有力的评估手段<sup>[10]</sup>,本文将利用多维模糊函数对设计波形进行定性和定量的评价。

### 3 非线性调频信号设计与空域编码

#### 3.1 非线性调频信号设计

脉冲压缩是提高雷达探测距离分辨率的有效手段,因此通常使用调频信号作为脉冲体制雷达的发射波形。LFM信号脉冲压缩后的距离旁瓣较高,在实际应用中通常采用加窗的方式降低旁瓣,无法避免地引入信噪比损失和主瓣展宽。而非线性调频信号具有更高的设计自由度,可以通过“削尖”频谱形状达到降低脉压旁瓣的效果,同时不会因为加窗损失信噪比<sup>[14]</sup>。常用的NLFM波形有正切调频、S型调频和正弦调频等,本文选择正切调频波形作为FDA雷达的发射波形开展研究,其时间-频率关系表达式如下

$$f(t) = B \tan(2\beta t/T_p) / (2 \tan \beta) \quad (13)$$

其中,  $B$ 表示发射信号带宽,  $T_p$ 表示脉冲持续时间,  $\beta = \arctan \alpha$ ,  $\alpha$ 为波形调制参数,当 $\alpha = 0$ 时式(13)所示的调频信号等价于LFM信号。下面给出相同带宽和脉冲宽度条件下,不同波形调制参数的正切调频信号与LFM信号的频谱形状和距离自相关函数对比图。

如图4(a)所示,正切调频信号的频谱呈锥形,类似于常用的频域窗函数的形状。正切调频波形的调制参数 $\alpha$ 越大频谱形状越尖锐,但同时频谱边缘

震荡也越剧烈。图4(b)对比了LFM与两种正切调频波形的自相关函数,并定量给出了三者的峰值旁瓣比(Peak to Side Lobe Ratio, PSLR)分别为-13.41 dB, -21.74 dB和-27.55 dB。3种波形具有相同的主瓣3 dB分辨率,但是正切调频波形明显具有更低的距离旁瓣,代价是与LFM波形相比存在不同程度的主瓣展宽。对比两种不同参数 $\alpha$ 对应的正切调频波形可以看出,虽然 $\alpha = 4$ 时比 $\alpha = 2$ 时具有更低的自相关旁瓣,但其主瓣展宽严重,从而影响其对目标精细结构的分辨能力。文献[15]指出由于正切调频波形脉压后倾向于产生畸变,因此波形调制参数 $\alpha$ 不能做得任意大。实际应用中,通常需要对 $\alpha$ 在一定区间内进行遍历搜索,以得到最合适的发射波形。

#### 3.2 空域编码

由第2节可知,相干FDA雷达由于其波束主瓣在脉冲持续时间内具有方位向连续扫描特性,因此其在相同的方位观测角度上的照射时间小于相控阵雷达。对于 $M$ 元一维均匀线阵相干FDA雷达的波束驻留时间和等效距离向带宽仅为相控阵雷达的 $1/M$ 。为了改善相干FDA雷达的距离向分辨力,本文利用阵列方向图控制技术,通过在阵元间引入时不变的空域相位编码<sup>[16]</sup>改变发射阵列的波束方向图,等效延长了FDA雷达波束扫描过程中对目标的照射时间,从而在接收端恢复发射信号带宽,改善距离分辨率。本文选择13位巴克码进行空域相位编码,图5分别对比了引入空域相位编码前后阵列方向图和接收信号的频谱结构。

由图5(a)可知引入巴克码进行空域相位编码使得阵列波束方向图主瓣和旁瓣之间的幅度差明显减小,形成近似正交MIMO雷达的全向方向图,从而延长了FDA雷达波束扫描过程中在一个方位位置上的波束驻留时间。图5(b)表示不同模式下接收信

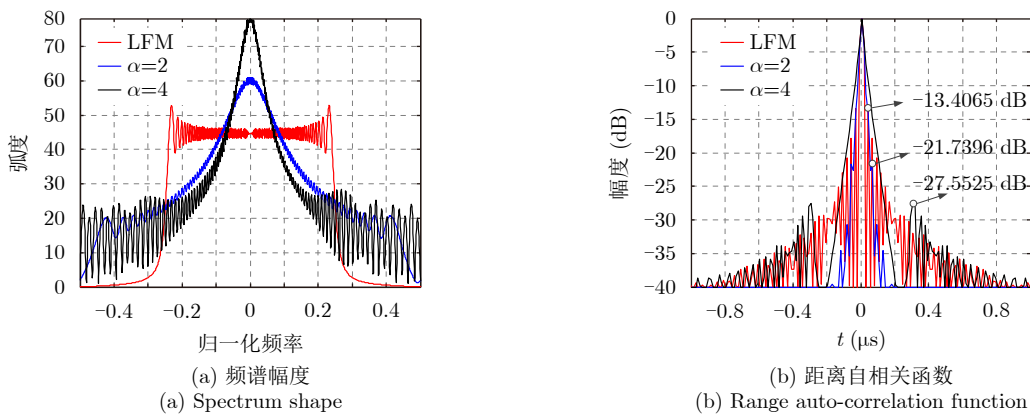


图4 正切调频与LFM信号的频谱形状与距离自相关函数对比

Fig. 4 The comparisons of spectrum shape and range auto-correlation function between Tangent FM and LFM signals

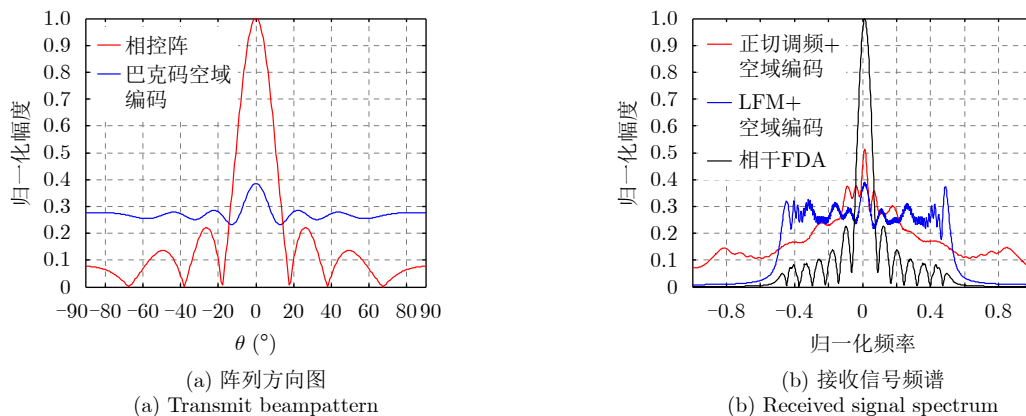


图5 空域相位编码前后的阵列方向图和接收信号带宽对比

Fig. 5 The comparisons of the array beampattern and the received signal spectrum before and after hybrid coding

号的频谱结构，明显看出引入巴克码进行空域相位编码可以在接收端获得比相干FDA雷达更大的接收信号带宽，因此改善了FDA雷达的距离分辨率。此外，时不变的空域相位编码不会影响FDA雷达的波束扫描性质，4.1节通过多维模糊函数进一步说明引入空域编码后FDA雷达仍具有全空域均匀覆盖能力。

引入空域相位编码的发射信号表达式如下

$$s'_T(t, \theta) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \sum_{m=1}^M b_m e^{j2\pi d(m-1)\sin\theta/\lambda} e^{j2\pi f_m t} \phi(t) \quad (14)$$

其中， $b_m$ 为第 $m$ 个阵元对应的编码相位。引入空域编码后接收端的多维匹配滤波器表达式如下

$$\mathbf{H}'(t, \theta') = (\mathbf{a}_R^H(\theta') \odot \mathbf{b}^H) s'^*_T(t, \theta) \quad (15)$$

其中， $\odot$ 表示Hadamard积， $\mathbf{b}$ 表示与阵元数对应的巴克码矢量。空域编码可以有效恢复相干FDA雷达波形的距离向分辨率，但同时也会抬高自相关函数的距离旁瓣幅度，针对这一问题本文提出了“正切调频+空域编码”的FDA雷达波形设计方法，可以达到改善距离分辨率，同时降低自相关旁瓣的效果。

## 4 实验与仿真

设计如表1所示的FDA雷达系统参数，用于评估本文提出的正切调频与空域编码联合的波形设计方法。首先以第2节介绍的多维模糊函数作为评价

表1 FDA雷达系统参数

Tab. 1 System parameters of FDA radar

信号参数	数值	系统参数	数值
载频 $f_0$	3 GHz	阵元间距	0.05 m
带宽 $B$	100 MHz	载频偏移量 $\Delta f$	200 kHz
脉冲宽度 $T_p$	5 $\mu$ s	阵元数 $M$	13

手段，对本文提出的“正切调频+空域编码”波形、“LFM+空域编码”波形(使用13位巴克码用于空域相位编码)和传统相干FDA雷达的自相关旁瓣性能、主瓣展宽系数、距离分辨率以及空域覆盖能力进行对比分析，并且对正切调频的波形调制参数的影响进行定量分析。接着进行一维距离向高分辨率成像仿真，对比本文提出的波形设计方法与LFM波形在相干FDA雷达一维高分辨率距离向成像应用中的优势。最后，针对非线性调频信号多普勒敏感性强的特点，分析了不同波形调制参数下，本文提出的波形设计方法对不同运动速度目标的观测能力。

### 4.1 多维模糊函数分析

由式(12)可知雷达波形的多维模糊函数 $|\chi(\tau, f_d, \theta, \theta')|^2$ 是一个四维函数，不方便直观表示，因此可以通过其不同的降维表达式进行定性和定量分析。其距离-多普勒模糊函数 $|\chi(\tau, f_d)|_{\theta=\theta'=0}$ 与传统模糊函数定义类似，可用于分析波形的自相关性能和多普勒容忍性。角度-角度模糊函数 $|\chi(\theta, \theta')|_{\tau=0, f_d=0}$ 表示在 $\tau=0, f_d=0$ 条件下，目标不同方位角 $\theta$ 和接收方向图波束指向 $\theta'$ 对接收增益的影响，用来评价波形的空域覆盖能力。距离-角度模糊函数 $|\chi(\tau, \theta)|_{\theta'=0, f_d=0}$ 表示在零多普勒条件下，固定接收波束形成指向 $\theta'=0^\circ$ ，波形对不同方位位置 $\theta$ 的目标的分辨能力。

下面分别对比了在表1所示的参数下，相干FDA雷达、“LFM+空域编码”和“正切调频+空域编码”3种模式的多维模糊函数，其中正切调频波形调制参数设置为 $\alpha=2.1$ 。首先，对比3种模式的距离-多普勒模糊函数，如图6所示。

由图6(a)可知，相干FDA雷达波形在脉压后主瓣展宽严重，导致其距离向分辨率恶化，但由于其相邻阵元间发射信号的脉压旁瓣相互抵消，因此具

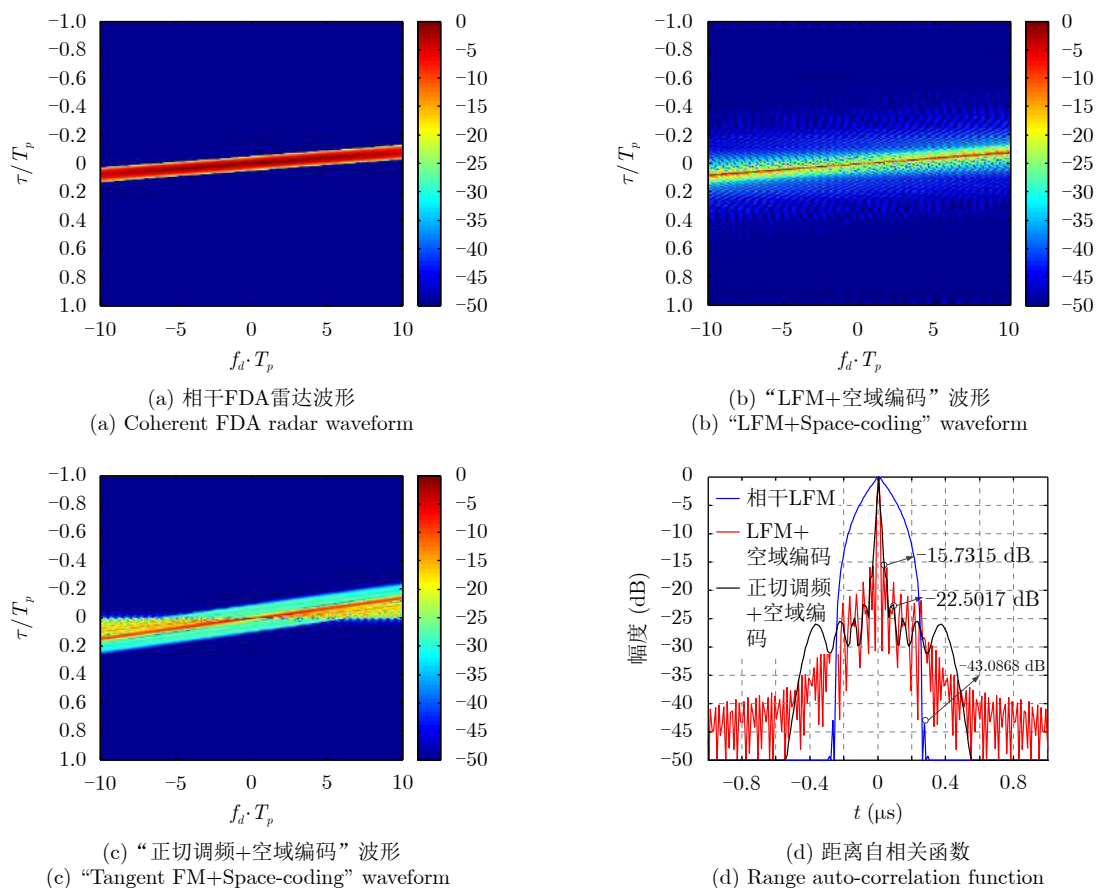


图 6 距离-多普勒模糊函数

Fig. 6 Range-Doppler ambiguity function

有极低的自相关旁瓣。图6(b)与图6(a)进行比较可以看出“LFM+空域编码”波形在距离脉压后主瓣宽度明显减小,说明在阵元间引入空域编码有效地改善了相干FDA雷达的距离向分辨率,但其距离自相关函数的距离旁瓣较高。由图6(c)所示的“正切调频+空域编码”波形的距离-多普勒模糊函数可以看出,其在零多普勒位置同样具有良好的聚焦性能且距离旁瓣明显低于“LFM+空域编码”波形,但随着多普勒频率增加其主瓣发生畸变出现了非对称旁瓣。图6(d)将3种波形在零多普勒位置的剖面,即距离自相关函数进行了比较,可以看出相干FDA雷达波形具有最低的PSLR,达到了-43.09 dB,而“正切调频+空域编码”波形的PSLR比“LFM+空域编码”波形低6.77 dB,也具有较好的峰值旁瓣性能。对比3种波形的距离向分辨率,可得“正切调频+空域编码”波形与“LFM+空域编码”波形具有相同的3 dB分辨率均为1.5 m与理论分辨率相吻合,相干FDA雷达的距离向分辨率为16.5 m与1.5 m的理论分辨率相比恶化十分严重。

接下来对比了相干FDA雷达波形、“正切调频+空域编码”波形和相控阵雷达的角度-角度模糊

函数 $|\chi(\theta, \theta')|_{\tau=0, f_d=0}$ , 如图7所示。它反映了在发射波束形成指向 $\theta_0 = 0^\circ$ 时,目标方位角 $\theta$ 和接收波束形成指向 $\theta'$ 对雷达系统匹配接收增益的影响。图7(a)和图7(b)的对角线上形成高增益的特征,说明当接收波束形成指向对准目标方位位置(即 $\theta = \theta'$ )时,即可形成均匀的高接收增益,而与阵列发射波束形成无关,这充分说明了FDA雷达具有全空域均匀覆盖的能力。由图7(c)可知,对于传统相控阵雷达只有当阵列的发射波束形成指向 $\theta_0$ 、目标方位位置 $\theta$ 和接收方向图波束指向 $\theta'$ 三者相等时才能形成较强的接收增益。图7通过对比说明了FDA雷达是实现全空域探测、监视的有效手段。与正交MIMO雷达相比,相干FDA雷达不仅实现了能量在照射空域的均匀覆盖,而且其波形更易满足恒模约束也更易工程实现。

最后对比3种模式的距离-角度模糊函数,如图8所示。

首先,对比图8中3种模式在 $\theta = 0^\circ$ 位置的主瓣宽度可以看出,引入空域编码后的距离向主瓣宽度与相干FDA雷达相比明显减小,说明距离分辨率得到了显著改善。沿横轴进行比较可以看出,当接



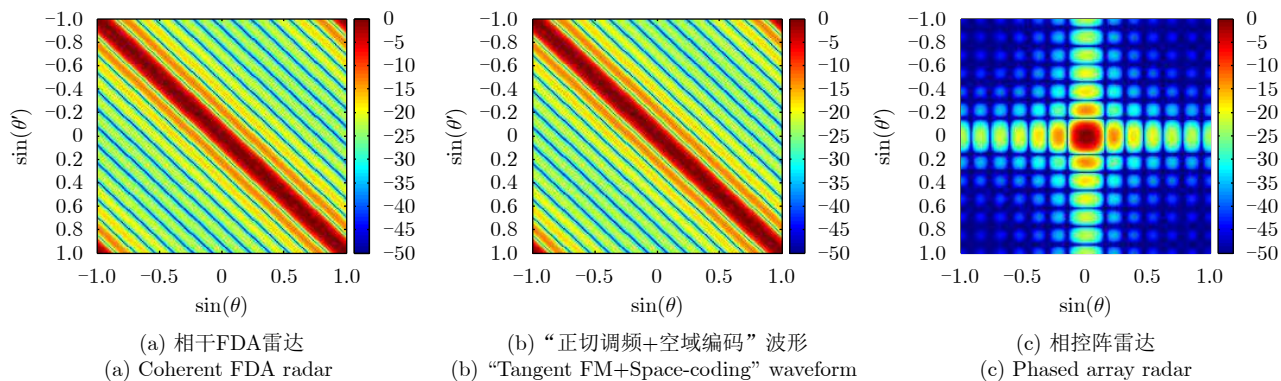


图7 角度-角度模糊函数

Fig. 7 Angle-angle ambiguity function

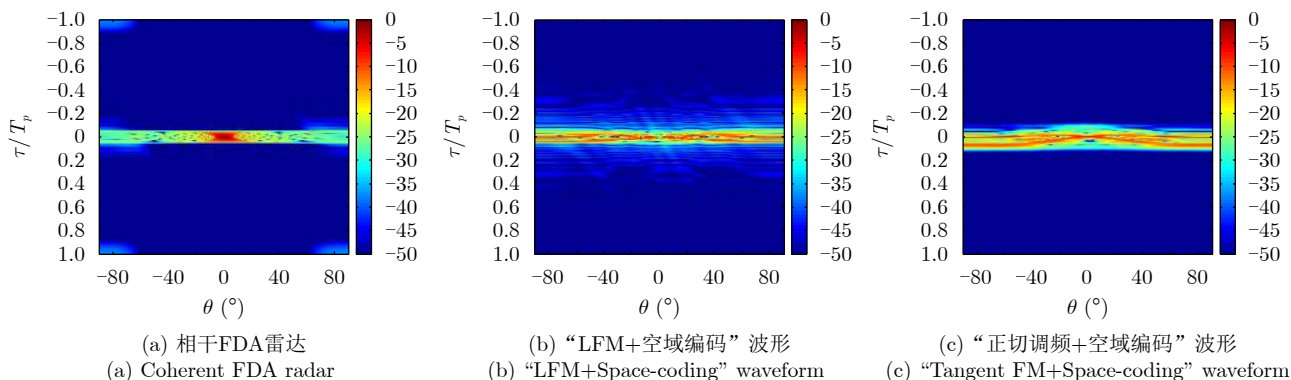


图8 距离-角度模糊函数

Fig. 8 Range-angle ambiguity function

收波束形成指向固定在 $\theta' = 0^\circ$ 时，相干FDA雷达的接收能量集中在目标方位位置 $\theta = \theta'$ 附近。而引入空域编码的两种波形虽然也在 $\theta = \theta'$ 位置上获得最高的接收增益，但接收能量同时散布在目标方位 $\theta \neq \theta'$ 的位置上。这是由于引入巴克码进行空域相位编码后形成了类似全向的阵列方向图，相比于相干FDA雷达造成了发射增益的损失。

由3.1节可知，波形的调制参数 $\alpha$ 直接影响正切调频波形脉压后的PSLR和主瓣展宽系数。为了定量研究波形的调制参数 $\alpha$ 对波形脉压性能的影响，图9以“LFM+空域编码”波形为参考，分别定义PSLR增益 $\Delta\text{PSLR} = \text{PSLR}_{\text{LFM}} - \text{PSLR}_{\text{NLFM}}$ 和3 dB主瓣展宽系数 $\delta = \text{width}_{\text{NLFM}}/\text{width}_{\text{LFM}}$ ，研究二者随调制参数 $\alpha$ 的变化曲线。

图9说明正切调频波形的脉压性能受到波形调制参数 $\alpha$ 的影响。如图9(a)所示，正切调频波形的PSLR增益在 $\alpha \in (0, 3]$ 的区间上变化剧烈，在这段区间上的最大增益出现在 $\alpha = 2.1$ 时达到6.77 dB，当 $\alpha \geq 4$ 时PSLR增益随 $\alpha$ 的增大缓慢增加。如图9(b)所示，正切调频波形的展宽系数 $\delta$ 与调制参数 $\alpha$ 呈正相关的趋势，在 $\alpha \in (0, 3]$ 时主瓣展宽系数保持在较低的水平，当 $\alpha \geq 4$ 时，主瓣展宽系数剧烈

增加。综上，波形调制参数 $\alpha$ 显著影响正切调制波形的脉压性能，在 $\alpha \in (0, 3]$ 时主瓣展宽系数较低， $\alpha \geq 4$ 时虽然波形脉压后具有更低的距离旁瓣，但是 $\alpha$ 过大导致严重的主瓣展宽不利于在高分辨率距离向成像中反映目标的精细结构。

#### 4.2 一维距离向成像性能分析

为了直观反映本文提出的“正切调频+空域编码”波形的距离向高分辨能力，进行了一维距离向成像仿真实验。假设目标中心位于距离雷达 $r_0 = 100$  km处，目标抽象为由3个点目标组成，相对距离为[0 m, 5 m, 15 m]，雷达散射系数(Radar Cross Section, RCS)分别为[1, 10, 5]。假设接收方向图波束指向与目标方位角重合，取 $\alpha = 2.1$ ，利用式(10)中的匹配滤波器得到FDA雷达“LFM+空域编码”波形与“正切调频+空域编码”波形对上述目标的一维距离向成像结果如图10所示。

图10用红色虚线标出了目标实际所在的距离单元。对比图10(a)和图10(b)可知，对于RCS较大的点目标2和点目标3，两种波形都可以准确得到其一维距离向成像结果，其脉压峰值都出现在正确的距离单元上。而对于点目标1，由于受到相邻的RCS较大的点目标2的距离旁瓣的影响，使用“LFM+



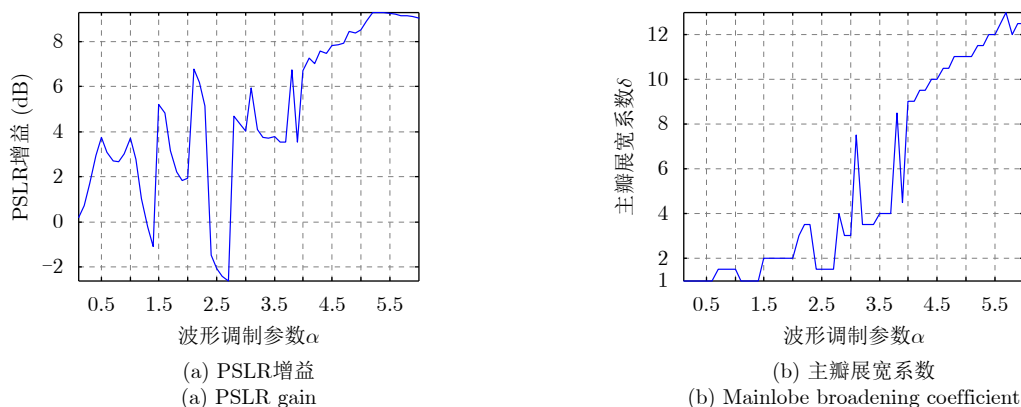
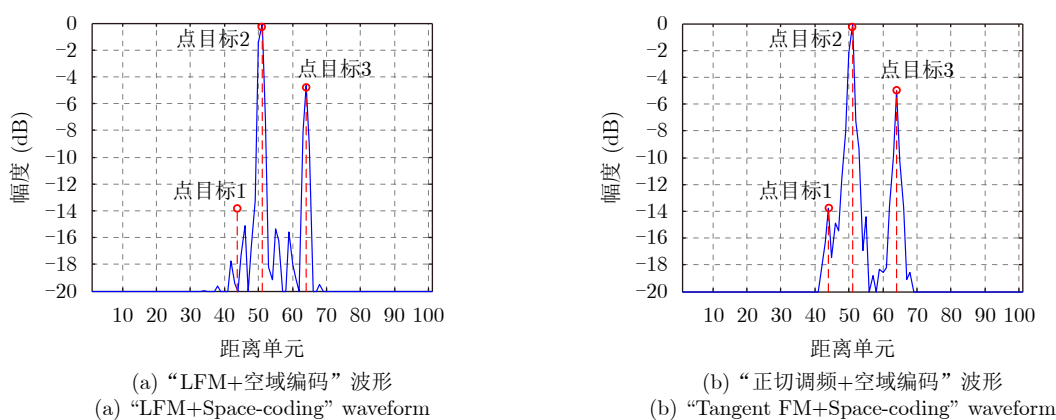
图9 脉压性能指标随 $\alpha$ 的变化曲线Fig. 9 The variation curves of pulse compression performance indexes changing with  $\alpha$ 

图10 一维距离向成像结果

Fig. 10 Range imaging results of three targets

空域编码”波形时无法得到准确的一维距离向成像结果。而“正切调频+空域编码”波形得益于其低距离旁瓣的优势，因此可以获得点目标1准确的一维距离相。

#### 4.3 多普勒敏感性分析

非线性调频波形与LFM波形相比主要的缺点在于其多普勒敏感性较强，对于高速运动目标成像效果较差。如图6(c)所示，当目标多普勒频率增加时，正切调频波形的脉压结果呈现出主瓣位置偏移和非均匀旁瓣现象。目前，第5代喷气式战斗机的最大时速在3马赫左右，俄罗斯“先锋”高超声速弹道导弹据报道最高时速可达20马赫。假设当目标相对运动速度分别为3马赫(1.02 km/s)和20马赫(6.8 km/s)时，FDA雷达“正切调频+空域编码”波形的脉压输出如图11所示，其中零多普勒情况下的脉压输出作为参考。

图11给出了波形调制参数 $\alpha = 2$ 和 $\alpha = 4$ 对应的脉压输出结果。当目标相对运动速度3马赫时， $\alpha = 2$ 和 $\alpha = 4$ 对应的脉压输出的主瓣峰值增益均下降了0.87 dB，主瓣峰值偏移均小于一个距离分辨

单元，PSLR相对零多普勒情况下分别恶化了3.21 dB和3.41 dB。当目标相对运动速度20马赫时， $\alpha = 2$ 和 $\alpha = 4$ 对应的脉压主瓣峰值增益分别下降了3.06 dB和3.98 dB，主瓣峰值位置偏移分别为1.5 m和3 m，PSLR分别恶化了2.56 dB和4.42 dB。综上，对于相对运动速度在3马赫的目标，正切调频波形能够保持良好的脉压性能，主瓣增益和主瓣峰值位置没有明显变化。对于运动速度在20马赫的超高速目标，正切调频波形的脉压性能受多普勒效应的影响产生主瓣峰值增益下降和位置偏移，并产生非对称旁瓣，影响观测效果。

## 5 结论

本文提出了一种正切频率调制和空域相位编码联合的FDA雷达波形设计方法，在有效改善相干FDA雷达距离分辨率的同时具有比LFM波形更低的距离旁瓣。本文从FDA雷达时变发射方向图的角度分析了相干FDA雷达距离分辨率下降的原因，并针对这一问题引入阵元间的空域相位编码，有效提高了相干FDA雷达的距离分辨率。同时为了降低脉压后的距离旁瓣，本文研究了具有锥形频

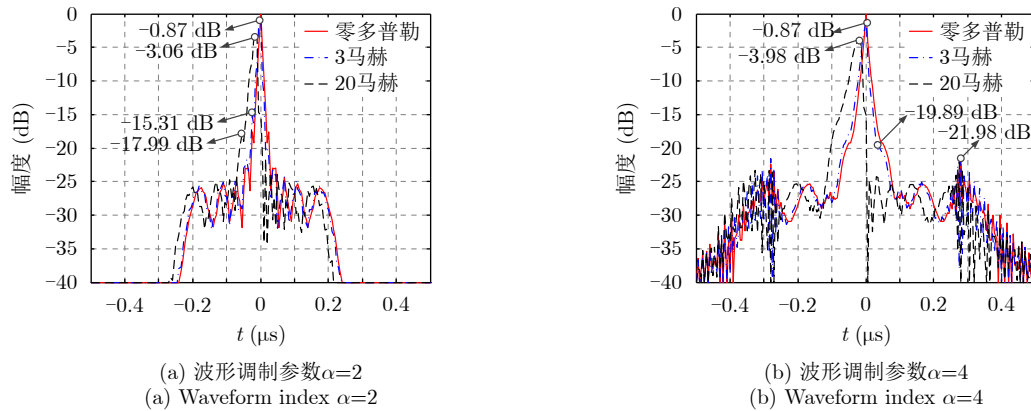


图 11 目标高速相对运动时的脉压输出

Fig. 11 Pulse compression output for moving targets with high speed

谱形状的正切调频波形作为时域发射波形，有效降低了脉压后的PSLR并增加了波形设计的自由度。仿真实验证明了本文提出的“正切调频+空域编码”波形在FDA雷达体制下同时具有距离向高分辨和低PSLR的良好性能，对于相对速度3马赫的高速运动目标仍能保持良好的聚焦效果。在本文研究基础上，还可以针对FDA雷达体制进一步开展对更高自由度的非线性调频波形和其他空域编码方式的研究。

### 参考文献

- [1] ANTONIK P, WICKS W C, GRIFFITHS H D, *et al.* Frequency diverse array radars[C]. 2006 IEEE Conference on Radar, New York, USA, 2006: 470–475.
- [2] XU Yanhong, SHI Xiaowei, XU Jingwei, *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.20881](https://doi.org/10.1002/mmce.20881).
- [3] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, *et al.* Joint range and angle estimation using MIMO radar with frequency diverse array[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(13): 3396–3410. doi: [10.1109/TSP.2015.2422680](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2422680).
- [4] WANG Wenqin. Frequency diverse array antenna: New opportunities[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(2): 145–152. doi: [10.1109/MAP.2015.2414692](https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2414692).
- [5] 许京伟. 频率分集阵列雷达运动目标检测方法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2015.  
XU Jingwei. Study on moving target detection with frequency diverse array radar[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2015.
- [6] XU Jingwei, LIAO Guisheng, ZHU Shengqi, *et al.* Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2015, 113: 9–17. doi: [10.1016/j.sigpro.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.01.014).
- [7] 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: [10.1199/JEIT151235](https://doi.org/10.1199/JEIT151235).  
WANG Wenqin, SHAO Huaizong, and CHEN Hui. Frequency diverse array radar: Concept, principle and application[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(4): 1000–1011. doi: [10.1199/JEIT151235](https://doi.org/10.1199/JEIT151235).
- [8] 许京伟, 朱圣棋, 廖桂生, 等. 频率分集阵列雷达技术探讨[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 167–182. doi: [10.12000/JR18023](https://doi.org/10.12000/JR18023).  
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](https://doi.org/10.12000/JR18023).
- [9] 项喆, 陈伯孝. 频率分集阵列的距离角度解耦的波束形成[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 212–219. doi: [10.12000/JR16113](https://doi.org/10.12000/JR16113).  
XIANG Zhe and CHEN Baixiao. Range-angle decoupled transmit beamforming with frequency diverse array[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 212–219. doi: [10.12000/JR16113](https://doi.org/10.12000/JR16113).
- [10] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Multi-dimensional ambiguity function for coherent pulsed-LFM FDA radar[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1169: 012017. doi: [10.1088/1742-6596/1169/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1169/1/012017).
- [11] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Transmit beampattern design for coherent FDA by piecewise LFM waveform[J]. *Signal Processing*, 2019, 161: 14–24. doi: [10.1016/j.sigpro.2019.03.010](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.03.010).
- [12] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Subarray-based coherent pulsed-LFM frequency diverse array for range resolution enhancement[J]. *IET Signal Processing*, 2020, 14(4): 251–258. doi: [10.1049/iet-spr.2018.5566](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2018.5566).
- [13] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Space-time matched filter design for interference suppression in coherent frequency diverse array[J]. *IET Signal Processing*,

2020, 14(3): 175–181. doi: [10.1049/iet-spr.2019.0227](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2019.0227).

- [14] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 318–322.  
SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 318–322.
- [15] COLLINS T and ATKINS P. Nonlinear frequency

modulation chirps for active sonar[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(6): 312–316. doi: [10.1049/ip-rsn:19990754](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:19990754).

- [16] BABUR G, AUBRY P, and LE CHEVALIER F. Simple transmit diversity technique for phased array radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1046–1056.

### 作者简介



于 雷(1995–), 男, 吉林延吉人, 博士研究生。2013年在大连理工大学电子信息与电气工程学部获得学士学位。2019年在国防科技大学电子科学学院获得硕士学位。主要研究方向为MIMO雷达信号处理、阵列雷达波形分集技术等。



粟 毅(1961–), 男, 山东泰安人, 博士, 教授。2001年在国防科技大学电子科学与工程学院获博士学位。现担任国防科技大学电子科学学院教授、博士生导师, IEEE高级会员。主要研究方向为信号处理、遥感信息处理。



何 峰(1976–), 男, 湖北孝感人, 博士, 研究员。2005年在国防科技大学获信息与通信工程博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院研究员。主要研究方向为雷达信号处理, 目前已发表论文86篇。



张永胜(1977–), 男, 内蒙古人, 博士, 高级工程师。2007年在国防科技大学获信息与通信工程博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院高级工程师。主要研究方向为SAR系统设计和信号处理, 目前已发表SCI论文24篇。



董 臻(1973–), 男, 安徽人, 博士, 教授。2001年在国防科技大学获信息与通信工程博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院教授。主要研究方向为SAR系统设计和信号处理、GMTI和数字波束形成技术。



吴曼青(1965–), 男, 安徽桐城人, 研究员级高级工程师, 中国工程院院士。1990年3月毕业于国防科学技术大学电子技术系通信与电子系统专业。