

子阵结构 FDA 阵列模糊函数建模与研究

王 博¹, 谢军伟¹, 张 晶², 孙渤森³

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 陕西交通职业技术学院, 西安, 710018; 3. 西安财经大学, 西安, 710100)

摘要 基于模糊函数的优化是频率分集阵列 FDA 雷达波形设计的重要手段, 针对现有文献中缺乏对子阵结构频率分集阵列模糊函数研究的问题展开分析。首先建立了窄带条件下发射简单脉冲的 FDA 阵列数据模型, 对比了 FDA 阵列与相控阵的方向图特性; 在此基础上, 基于信号经匹配滤波器输出的时域卷积出发推导出 FDA 阵列在三种接收信号处理机制下的复型模糊函数; 然后, 对采用不同频控函数的交叉子阵 FDA 阵列的发射方向图特性、模糊函数特性分别展开分析, 并用仿真验证了采用正弦频控函数的 FDA 阵列具有较好的干扰抑制性能的结论, 从而为后续基于子阵 FDA 阵列的模糊函数设计雷达波形以实现干扰抑制的一系列研究奠定了重要基础。

关键词 频率分集阵列; 模糊函数; 非线性频偏; 矩形脉冲信号; 子阵

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.04.014

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)04-0090-07

Research on Negative Ambiguity Function Characteristics of Frequency Diverse Array

WANG Bo¹, XIE Junwei¹, ZHANG Jing², SUN Bosen³

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Shannxi Transportation and Vocational Technology University, Xi'an 710018, China;

3. Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aimed at the problems that the optimization based on ambiguity function is an important means of Frequency Diverse Array (FDA) radar waveform design, the ambiguity function of sub-array-based Frequency Diverse Array is lack of research in the existing literature, a data model for FDA transmitting simple pulses under narrow-band conditions is established and the beam-pattern characteristics of FDA arrays is compared to the phased arrays. On this basis, based on the time domain convolution of the signal through the matched filter output, the ambiguity function of the FDA array under three received signal processing architectures is derived. Then, the transmit beam-pattern characteristics and the ambiguity function characteristics of the cross sub-array-based FDAs with different frequency offset are analyzed separately. The result shows that the FDA with sinusoidal frequency offset has a good interference suppression performance. The correctness of the analysis is verified and an important foundation is laid by this method for a series of studies in designing radar waveforms based on the ambiguity function of the sub-array-based FDA to achieve interference suppression.

收稿日期: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61503408)

作者简介: 王 博(1991—), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事频率分集阵列雷达干扰抑制研究。E-mail: wb_wangbo1991@163.com

引用格式: 王博, 谢军伟, 张晶, 等. 子阵结构 FDA 阵列模糊函数建模与研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 90-96.
WANG Bo, XIE Junwei, ZHANG Jing, et al. Research on Negative Ambiguity Function Characteristics of Frequency Diverse Array[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(4): 90-96.

Key words: frequency diverse array; ambiguity function; nonlinear frequency offset; rectangular pulse signal; sub-array

相控阵技术现已得到十分广泛的应用,但仍然存在不能有效控制发射波束距离指向的问题。2006年,FDA 阵列作为一种“距离-角度”二维相关波束形成技术由 P. Antonik 在雷达会议上首次提出^[1]。与相控阵雷达(Phased Array, PA)通过移相器在阵元间引入固定相位差的电扫描方式不同,FDA 阵列在阵元间引入一个相比载频而言大小可忽略的固定频偏,从而实现了具有更高自由度的“时间-距离-角度”三维相关波束指向^[2-4]。因此在抑制距离相关性干扰的过程中有着巨大的应用价值。随着 FDA 研究的深入,涌现出大量基于阵元发射窄带条件下简单脉冲假设的研究文献^[5~10]。

现有 FDA 干扰对抗文献中较少有基于 FDA 模糊函数分析的深入研究^[11-13]。模糊函数是时间-频率复合的二维自相关函数,一定程度上体现了雷达波形以及所运用的匹配滤波器的相关特性,是分析 FDA 阵列雷达距离和多普勒分辨率、旁瓣性能、方向图距离-角度耦合特性以及噪声抑制性能的重要参数^[14]。本文重点对交叉子阵 FDA 阵列的模糊函数展开分析,为后续基于模糊函数的雷达发射波形设计及参数选择等一系列研究奠定基础。

1 数据模型

图 1 所示为一维均匀线性 FDA 阵列(Uniform Linear Array FDA, ULA-FDA)的基本结构^[1]。

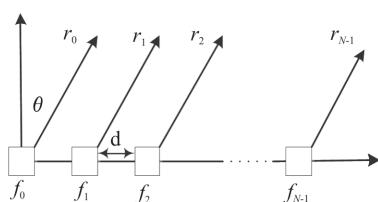


图 1 ULA-FDA 阵列基本结构

设载波频率为 f_0 ,阵元 n 的辐射信号频率为:

$$f_n = f_0 + \Delta f_n = f_0 + n\Delta f, n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

设阵元 n 的发射信号为:

$$s_t(t) = \sqrt{N}w_n^* u(t)e^{j2\pi f_n t}, n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (2)$$

式中: N 表示阵元总数; w_n^* 表示发射端信号加权的共轭; $u(t)$ 为发射端雷达波形。则阵元 n 发射的信号到达远场观测点(R, θ)的信号表达式 $s_t(t)$ 为:

$$s_t(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t - \frac{r_n}{c}) = \sqrt{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* u(t - \frac{r_n}{c})$$

$$e^{j2\pi f_n(t - \frac{r_n}{c})} \approx \sqrt{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n^* u(t - \frac{R}{c}) e^{j2\pi f_n(t - \frac{R}{c} + \frac{nd\sin\theta}{c})} \quad (3)$$

式中: $r_n = R - nd\sin\theta$, R 为参考阵元到目标点的距离, d 为阵元间距, c 表示光速。

窄带条件下,式(2)可简化为:

$$s_t(t) = \exp(j2\pi f_n t), n=0,1,\dots,N-1 \quad (4)$$

因而,式(3)可改写为:

$$s_t(t) = \exp[j2\pi f_n(t - \frac{r_n}{c})] \quad (5)$$

一般的,阵元 n 与阵元 $n-1$ 发射的信号传播到远场点观测点(R, θ)时所形成的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= 2\pi f_n(t - \frac{r_n}{c}) - 2\pi f_{n-1}(t - \frac{r_{n-1}}{c}) = \frac{2\pi f_0 d \sin\theta}{c} + \\ &2\pi\Delta f t - \frac{2\pi\Delta f R}{c} + \frac{2\pi(2n-1)\Delta f d \sin\theta}{c} \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\Delta f = 0$ 时, $\Delta\phi = \frac{2\pi f_0 d \sin\theta}{c}$, FDA 阵列退化

为传统的相控阵。式(6)中的第 1 项表示阵元信号在观测点处的相位差,这是由阵元间传播距离引起的;第 2 项表明 $\Delta\phi$ 是时间的函数,针对 FDA 阵列方向图特性研究的文献中多取 $t=0$,以研究静止状态下的 FDA 阵列特性;第 3 项表明 $\Delta\phi$ 与距离 R 及频偏 Δf 相关,这一项是 FDA 阵列辐射方向图具有距离相关性的基础;由于 $f_0 \gg N \cdot \Delta f$,第 4 项在运算中经常可以忽略。综上所述,式(6)可简化为:

$$\Delta\phi \approx 2\pi\Delta f t + \frac{2\pi f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{2\pi\Delta f R}{c} = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 \quad (7)$$

式中: $\Delta\phi_1 = 2\pi\Delta f t$ 为两相邻阵元初始信号因脉宽产生的时变相位差; $\Delta\phi_2 = 2\pi[\frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}]$ 为电磁波传播过程中由于频差及波程差造成的相位差,该相位差与距离、角度呈线性关系。图 2~3 分别为目标位于(200 km, 30°), $t=0$ 时相控阵和 FDA 阵列的发射方向图。由图可知在某一固定时刻,与相控阵波束指向只与角度相关不同,FDA 波束图是距离-角度的函数。这一特性在雷达目标的距离-方位角联合估计、射频隐身以及干扰、抗干扰等领域都有广阔的应用前景。但 FDA 的波束图存在多值性问题,这是由于 FDA 阵元间的均匀线性频偏增量 Δf 与阵元间距 d 的线性递增同步导致的距离-角度耦合所引起的。

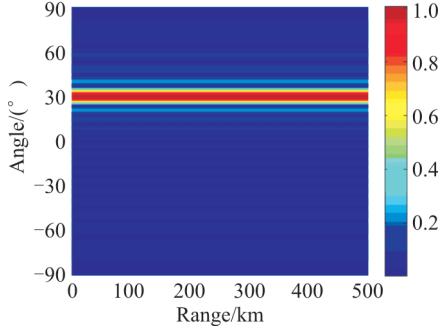


图 2 PA 发射方向图

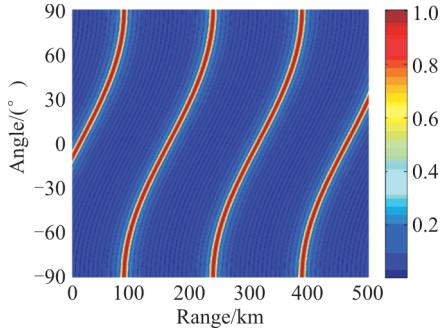


图 3 FDA 发射方向图

2 FDA 阵列模糊函数

模糊函数在分析 FDA 阵列雷达距离和多普勒分辨率、旁瓣性能、方向图距离-角度耦合特性以及噪声抑制性能等方面有着重要作用,根据定义的不同可分为直观模糊函数与负型模糊函数。基于差平方积分原则,从分辨 2 个延迟差为 τ 、频移差为 ξ 的目标的距离-速度二维分辨率出发可得直观模糊函数^[15]:

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t + \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (8)$$

其频域表示为:

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} U(f) U^*(f - \xi) e^{-j2\pi f \tau} df \quad (9)$$

当信号具有多普勒频移时,其复包络为 $u(t) e^{j2\pi\xi t}$,此时信号经匹配滤波器输出的时域卷积即为负型模糊函数^[15]:

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t - \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (10)$$

其频域表示为:

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} U(f) U^*(f - \xi) e^{j2\pi f \tau} df \quad (11)$$

式(3)表示的发射信号经目标(R_0, θ_0)二次反射后被接收阵列阵元 m 接收的信号形式为:

$$\begin{aligned} y(t - \xi) &= s_t(t - \frac{r_m}{c}) e^{j2\pi f_d (\frac{r_m}{c})} \approx \\ &\sqrt{N} e^{-j2\pi \frac{\xi R}{c}} \sum_{n=0}^{N-1} u(t - \frac{R + r_m}{c}) e^{j2\pi f_n [\frac{r_m R - R_0}{c} + \frac{n\delta(\sin\theta - \sin\theta_0)}{c}]} e^{j2\pi\xi t} \approx \\ &\sqrt{N} e^{-j2\pi \frac{\xi R}{c}} \sum_{n=0}^{N-1} u(t - \frac{2R}{c}) e^{j2\pi f_n [\frac{2R - R_0}{c} + \frac{n\delta(\sin\theta - \sin\theta_0) + n\delta\sin\theta}{c}]} e^{j2\pi\xi t} \end{aligned} \quad (12)$$

上式中,阵元 m 接收的回波信号包含着发射阵列中所有阵元辐射的回波能量。通过在接收阵元之后接入不同的滤波器,可以将 FDA 雷达接收信号的处理分为不同的机制^[16-17]。在接收端采用带限相干处理机制(实际上相当于基于梳状滤波器的 FDA-BFF(FDA Based on Frequency Filter)接收机结构),接收信号通过窄带滤波器在第 m 通道中只滤出载频为 f_m 的信号:

$$\begin{aligned} y(t, \xi, \theta_0, R_0) &= \sum_{m=0}^{N-1} a_m^*(\theta_0, R_0) s_t(t - \frac{r_m}{c}) e^{j2\pi\xi(\frac{r_m}{c})} = \\ &\sqrt{N} e^{-j2\pi \frac{\xi R}{c}} \sum_{m=0}^{M-1} u(t - \frac{2R}{c}) e^{j2\pi f_m [\frac{2R - 2R_0}{c} + \frac{2m\delta(\sin\theta - \sin\theta_0)}{c}]} e^{j2\pi\xi t} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)为带限相干处理接收端的复合信号,考虑到 $f_0 \gg \Delta f_m$,经 $\exp(-j2\pi f_m t)$ 解调后可得接收端阵元 m 的信号为:

$$\begin{aligned} y_m(t, \xi, \theta_0, R_0) &= \sqrt{N} u(t - \frac{2R}{c}) e^{-j2\pi \frac{\xi R + 2f_0(R - R_0)}{c}} \cdot \\ &e^{-j2\pi \Delta f_m \frac{2(R - R_0)}{c}} e^{j2\pi\xi t} e^{j2\pi f_0 \frac{2m\delta(\sin\theta - \sin\theta_0)}{c}} \end{aligned} \quad (14)$$

取 $\vartheta = \sin\theta$,根据式(11)得经带限相干处理的 M 个信号分别经过匹配滤波器输出后叠加可得:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=0}^{M-1} \int_{-\infty}^{\infty} y_m(t, \xi, R, \vartheta) y_m^*(t', \xi', R', \vartheta') dt = \\ &N e^{-j2\pi \frac{\xi R + 2f_0(R - R_0)}{c}} \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j2\pi \Delta f_m \frac{2(R - R')}{c}} e^{j2\pi f_0 \frac{2m\delta(\vartheta - \vartheta')}{c}} \times \\ &\int_{-\infty}^{\infty} u(t - \frac{2R}{c}) u^*(t - \frac{2R'}{c}) e^{j2\pi(\xi - \xi')t} dt \end{aligned} \quad (15)$$

则经带限相干处理的 FDA 雷达模糊函数定义如下:

$$\begin{aligned} \chi(\xi, R, \vartheta, \xi', R', \vartheta_s) &= \sum_{m=0}^{M-1} \exp[-j2\pi \Delta f_m \frac{2(R - R')}{c}] \\ &\exp[j2\pi f_0 \frac{2m\delta(\vartheta - \vartheta')}{c}] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} u(t - \frac{2R}{c}) u^*(t - \frac{2R'}{c}) e^{j2\pi(\xi - \xi')t} dt' = \\ &\sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi \Delta f_m \frac{2\Delta R}{c}} e^{j2\pi f_0 \frac{2m\delta\Delta\vartheta}{c}} \times \int_{-\infty}^{\infty} u(t') u^*(t' + \frac{2\Delta R}{c}) e^{j2\pi\Delta\xi(t' + \frac{2R}{c})} dt' \end{aligned} \quad (16)$$

式中:取 $t' = t - \frac{2R}{c}$, $\Delta\xi = \xi - \xi'$, $\Delta R = R - R'$, $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta'$,式(11)是关于多普勒频移失配 $\Delta\xi$ 和时延的函数,取时延失配为 $\Delta\tau = \frac{2\Delta R}{c}$,则经带限相干处理的 FDA 雷达模糊函数表示如下:

$$\begin{aligned} \chi_{\text{FDA}}(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta) &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi \Delta f_n \Delta\tau} e^{j2\pi f_0 \frac{2m\delta\Delta\vartheta}{c}} \cdot \\ &\int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t + \Delta\tau) e^{j2\pi\Delta\xi t} dt \end{aligned} \quad (17)$$

3 交叉子阵 FDA 阵列

传统的 FDA 阵列阵元间采用均匀线性固定频偏,因其与阵元间距的线性递增同步而导致发射方向图中存在着距离-角度耦合。基于非线性频偏的 FDA 阵列由于消除了这种同步从而实现了方向图解耦,而其中采用立方函数及正弦形式的频偏增量结构在主瓣宽度、副瓣大小上具有明显的性能优势^[17]。单边交叉 FDA 阵列结构将 ULA-FDA 划分为图 4 中的 2 个应用不同非线性频偏增量的交叉子阵:

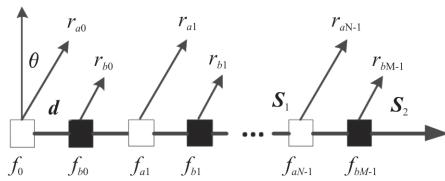


图 4 交叉子阵 FDA 阵列结构

其中,子阵 a 的阵元个数为 N ,子阵 b 的阵元个数为 M ,相邻阵元间的频偏为 Δf ,窄带条件下,远场目标点(R, θ)所接收到的子阵 a 中阵元 n 以及子阵 b 中阵元 m 的信号分别为:

$$s_{an} = \exp \left[j2\pi(f_0 + \Delta f_n)(t - \frac{R_0 - nd\sin\theta}{c}) \right] \quad (18)$$

$$s_{bm} = \exp \left[j2\pi(f_0 + \Delta f + \Delta f_m)(t - \frac{R_0 - mds\sin\theta}{c}) \right] \quad (19)$$

以 Δf_n 为例,当取线性、正弦、立方函数形式频偏增量时上式中 Δf_n 的取值分别为: $2(n-1)\Delta f$, $2\sin(n-1)\Delta f$ 和 $2(n-1)^3\Delta f$ 。远场目标位置处的场强为子阵 a 和子阵 b 场强的叠加。子阵结构 FDA 阵列方向图可以视作不同子阵在远场目标点位置处幅度响应的合成,因此子阵结构 FDA 阵列的模糊函数应为所有子阵模糊函数的叠加。设子阵 a 和子阵 b 经带限相干处理之后的模糊函数分别为 $\chi_a(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta)$ 和 $\chi_b(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta)$,则交叉子阵 FDA 阵列的模糊函数为:

$$\begin{aligned} \chi(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta) &= \chi_a(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta) + \\ &\chi_b(\Delta\tau, \Delta\xi, \Delta\vartheta) \end{aligned} \quad (20)$$

4 仿真分析

仿真验证本文分析的正确性,考虑 ULA-FDA 阵列发射-接收共型模型,考虑一个 20 阵元的 ULA-FDA 阵列,阵元间距 $d=c/(2f_0)$,载频为 $f_0=1$ GHz,阵元间频偏为 $\Delta f=4.5$ kHz,脉冲宽度为

$T_p=0.1$ ms。

4.1 仿真 1: FDA 雷达的矩形脉冲负型模糊函数

对包络为矩形的固定载频信号,取脉冲幅度为 $1/\sqrt{T_p}$, T_p 为脉冲宽度:

$$u_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_p}}, & t \in [0, T_p] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

令式(17)中 $\Delta\vartheta=0$,则阵元发射矩形脉冲的 FDA 负型模糊函数为:

$$\begin{aligned} |\chi(\xi, \tau)| = \\ \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi\Delta f_n \tau} \frac{\sin\pi\xi(T_p - |\tau|)}{\pi\xi(T_p - |\tau|)} \frac{T_p - |\tau|}{T_p}, & |\tau| \leqslant T_p \\ 0, & |\tau| > T_p \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

图 5 为矩形脉冲 FDA 阵列的负型模糊图,具有原点对称性,在匹配点处取得最大值。

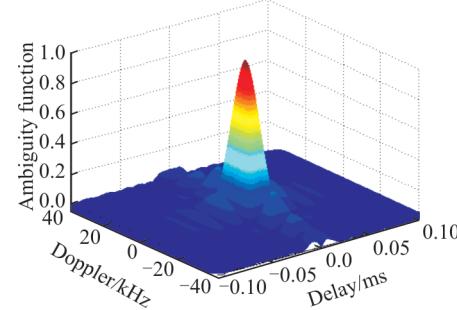


图 5 矩形脉冲 FDA 模糊图

图 6 为矩形脉冲 FDA 阵列负型模糊函数的二维等高图,可以用于分析信号的分辨力、混淆情况以及抗干扰状态。

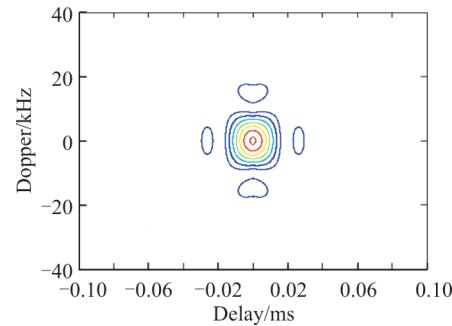


图 6 矩形脉冲 FDA 模糊函数等高图

图 6 近似为椭圆,其形状由脉冲宽度 T_p 决定。宽脉冲时,椭圆长轴和 τ 轴一致;窄脉冲时,椭圆长轴和 ξ 轴一致,原点附近不能沿 τ 轴和 ξ 轴缩短到任意程度。当 $\xi=0$ 时,式(22)可以改写为 $\sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi\Delta f_n \tau} \frac{T_p - |\tau|}{T_p}$,表示不存在多普勒失配时匹配滤波器的输出。如图 7 所示,相当于 $\xi=0$ 且过原点与 ξ 轴正交的平面截模糊图所得的交迹。与

相控阵的三角形曲线不同,图 7 所示为 sinc 函数形式。当 $\tau=0$ 时式(22)改写为 $N \frac{\sin \pi \xi T_p}{\pi \xi T_p}$, 表示在期望峰值时刻的匹配滤波器输出。如图 8 所示,相当于 $\tau=0$ 且过原点与 τ 轴正交的平面截模糊图所得的交迹。

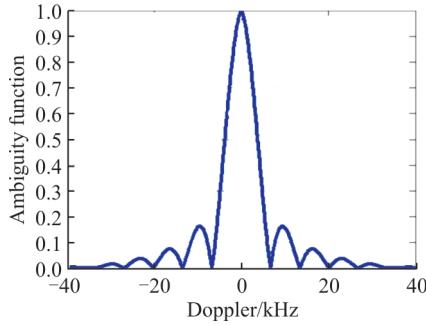


图 7 $\xi=0$ 的矩形脉冲模糊图

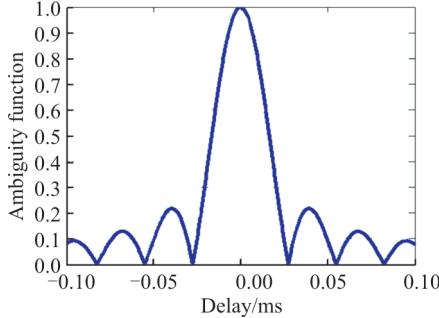


图 8 $\tau=0$ 的矩形脉冲模糊图

4.2 仿真 2: 交叉子阵 FDA 阵列方向图解耦

现有文献中针对 FDA 方向图解耦的方法主要分为 2 大类:一类是子阵结构等基于阵列结构设计的方法,一类是基于非线性最优化频偏增量设计的方法。本例中基于采用非线性频偏增量的交叉子阵 FDA 阵列仿真实现发射方向图的距离-角度解耦。针对位于(30 km, 30°)的目标,图 9 所示为 4 种不同频偏增量组合交叉子阵 FDA 阵列的发射方向图。与图 3 相比,图 9 所示的 4 种交叉子阵 FDA 方向图

的波束主瓣在目标位置处都可以形成点状的发射波束,但只有图 9(d)中的子阵结构一定程度上消除了图 3 中基本 FDA 阵列方向图中的多极值问题。

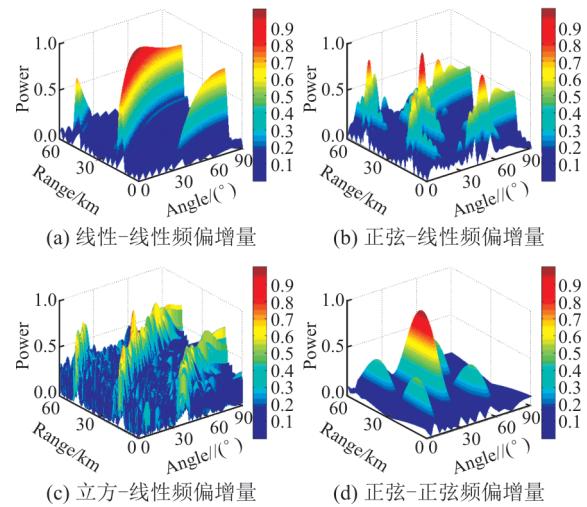
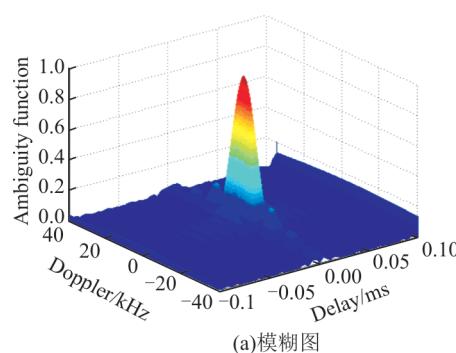


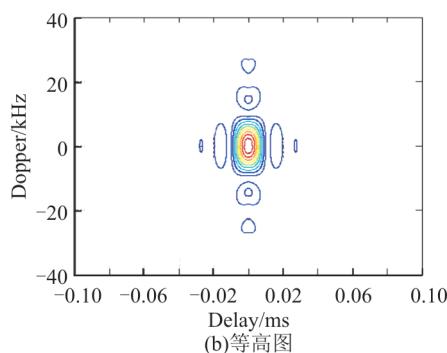
图 9 交叉子阵 FDA 发射方向图

4.3 仿真 3: 交叉子阵 FDA 阵列模糊函数

仿真 2 中 4 种阵列的发射方向图都能在目标位置处形成有效增益,实现方向图的距离-角度解耦。本例中,通过图 10~13 中 4 种频偏增量情况下发射矩形脉冲的 FDA 阵列模糊图及等高图,对比仿真 2 中 4 种 FDA 阵列的性能。与图 5 中采用线性增量的 ULA-FDA 阵列相比,图 10~13 中都不存在第 2 峰值,说明不存在距离或多普勒模糊。图 10 中的模糊图的目标分辨率有所提高,具有良好的距离模糊特性,但其速度分辨率没有提高;图 11 和 13 的传真结果近似一致,图中模糊图都出现展宽,这将导致目标分辨率降低;图 12 中出现了较高的旁瓣。综上,子阵结构 FDA 阵列在实现方向图解耦的同时,由于采用不同频偏增量,对 FDA 阵列的目标分辨率产生不同的影响。



(a) 模糊图



(b) 等高图

图 10 采用线性和线性频偏增量的交叉子阵 FDA 阵列

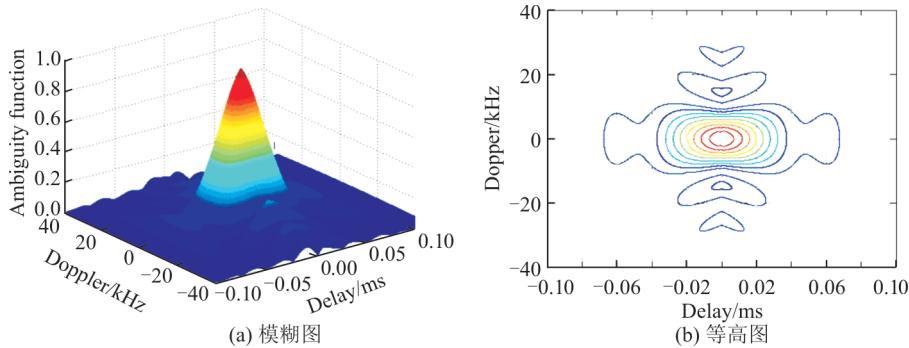


图 11 采用正弦和线性频偏增量的交叉子阵 FDA 阵列

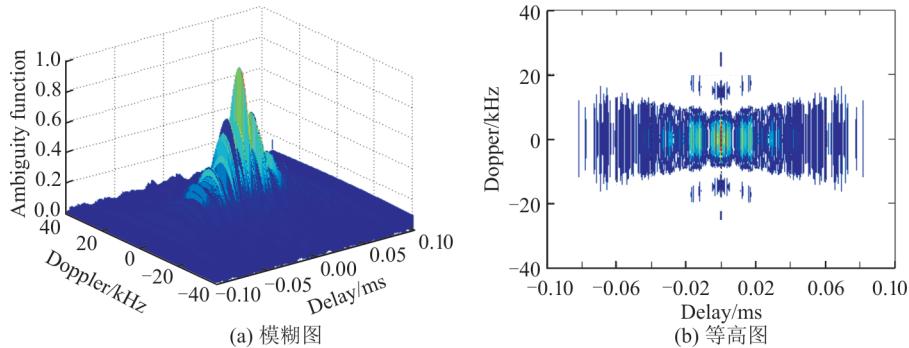


图 12 采用立方和线性频偏增量的交叉子阵 FDA 阵列

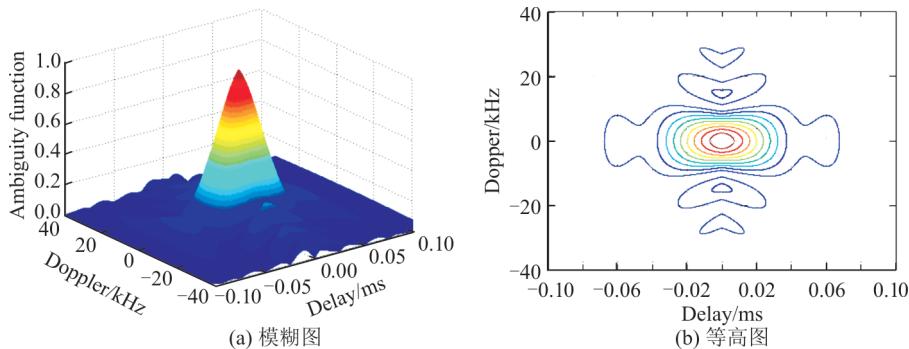


图 13 采用正弦和正弦频偏增量的交叉子阵 FDA 阵列

5 结语

FDA 雷达能够产生距离-角度-时间相关波束, 在雷达目标的距离-方位角联合估计、射频隐身以及前视探测与成像等领域都有广阔的应用前景。本文基于 ULA-FDA 阵列发射-接收共型阵列模型假设, 仿真分析了交叉子阵 FDA 模糊函数, 为后续基于模糊函数的雷达发射波形选择、阵列参数设计及子阵结构设计等一系列的研究奠定了重要基础。后续将进一步基于模糊函数分析 LFM 等脉冲压缩信号在 FDA 阵列雷达中的具体应用。

参考文献(References):

- [1] ANTONIK P, WICKS W C, GRIFFITHS H D, et al.

- Frequency Diverse Array Radars[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, Verona. NY: IEEE, 2006: 470-475.
[2] 王文钦, 陈慧, 郑植, 等. 频控阵雷达技术及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(2): 153-166.
WANG W Q, CHEN H, ZHENG Z, et al. Advances on Frequency Diverse Array Radar and Its Applications [J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 153-166. (in Chinese)
[3] 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.
XU J W, ZHU S Q, LIAO G S, et al. An Overview of Frequency Diverse Array Radar Technology [J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 167-182. (in Chinese)
[4] 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.
CHEN X L, CHEN B X, HUANG Y, et al. Frequen-

- cy Diverse Array Radar Signal Processing via Space-Range-Doppler Focus (SRDF) Method[J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 183-193. (in Chinese)
- [5] JONESA M Frequency Diverse Array Receiver Architectures[D]. OH, USA: Wright State University, 2011.
- [6] 许京伟. 频率分集阵列雷达运动目标检测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- XU J W. Study on Moving Target Detection with Frequency Diverse Array Radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [7] 高宽栋. 频控阵雷达阵列优化设计及其目标参数估计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- GAO K D. Research of Optimal Array Design and Parameter Estimation on Frequency Diverse Array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [8] 徐艳红. 新体制频率分集阵列天线距离/角度域波束研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- XU Y H. Research on the Beam of New Type Frequency Diverse Array in Range and Angle Domains [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [9] 王哲. 频控阵波束的距离角度依赖特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- WANG Z. Research on Range-Angle-Dependent Characteristics of Frequency DiverseArray Beampattern [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [10] 熊杰. 频控阵发射波束形成及其应用方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- XIONG J. Research on Transmitting Beamforming Technologyand Its Applications of Frequency Diverse-array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] DAI M M, WANG W Q, SHAO H Z. FDA Radar Ambiguity Function Optimization With Simulated Annealing Algorithm[C]//Proceeding of APSIPA Annual Summit and Conference, 2015: 741-743.
- [13] WANG W Q, DAI M M, ZHANG Z. FDA Rader Ambiguity Function Characteristics Analysis and Optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 3(54): 1368-1380.
- [14] M. Richards. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道,译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- RICHARDS M. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. XING M D, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [15] 丁璐飞. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- DING L F. Roder Principle [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [16] 张昭建, 谢军伟, 盛川, 等. 频率分集阵列接收机结构设计及方向图分析[J]. 华中科技大学学报, 2017, 45(6): 15-20.
- ZHANG Z J, XIE J W, SHENG C, et al, Frequency Diverse Array Receiver Architectures Design and Pattern Analysis[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2017, 45(6): 15-20. (in Chinese)
- [17] 王博, 谢军伟, 张晶, 等. 基于非线性频偏的频控阵波束控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(3): 311-319.
- WANG B, XIE J W, ZHANG J, et al. Study of Frequency Diverse Array Beam Control Based on Nonlinear Frequency Offset [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(3): 311-319. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)