

# 非线性频偏 FDA 对测向系统的欺骗研究

陈楚舒, 盛 川, 谢军伟, 王 博, 单泉铭

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 与相控阵仅具有角度相关性的波束指向不同, 频率分集阵列 FDA 通过在阵元间引入频偏的方式实现了具有更高自由度的电扫描波束。雷达方向侦查中, 基于相位法测向的干涉仪通过比相器可以得出辐射信号到达接收机的相位、确定 PA 辐射信号到达角, 威胁雷达安全。针对这一问题, 基于 FDA 波束的“弯曲”特性研究了对敌方雷达方向侦查过程实现测向欺骗的可能。在通过非线性频控函数设计实现 FDA 波束图距离-角度解耦的基础上, 仿真验证了远场条件下 log-FDA、sin-FDA 可对干涉仪测向产生欺骗, 证明 FDA 对干涉仪测向的影响随着频偏增量  $\Delta f$  和阵元间距  $d$  增大而增强, 且 log-FDA 始终比 sin-FDA 的性能更好。

**关键词** 频率分集阵列; 非线性频偏; 干涉仪; 欧拉公式; 角度欺骗

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.03.012

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)03-0070-08

## Research on the Deception of Direction-Finding System Based on FDA with Non-Linear Frequency Offset

CHEN Chushu, SHENG Chuan, XIE Junwei, WANG Bo, SHAN Quanming

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Unlike the beam pointing of phased array (PA), which is only angularly related, the beam pattern of frequency diverse array (FDA) achieves electrical scanning with higher degree of freedom by introducing a frequency offset between array elements. In view of the problem that in radar direction detection, the interferometer can determine the arrival angle of the radiation signal by obtaining the phase difference of the radiation signal reaching the receiver through the phase comparator which will threaten the safety of radar. Based on the “bending” characteristic of the FDA’s beam pattern, this paper studies the possibility of angle deception in the direction detection of enemy radar. Based on the range-angle decoupling technology realized by FDA using nonlinear frequency offset, we can prove that log-FDA and sin-FDA can deceive interferometer direction finding under far-field conditions. And the deceptive effect of log-FDA is better than that of sin-FDA. We can also draw conclusion that the deceptive effect will enhance with the increase of frequency offset  $\Delta f$  and the array spacing  $d$ .

**Key words** frequency diverse array; nonlinear frequency offset; interferometer; euler formula; angle deception

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(615034008)

作者简介: 陈楚舒(1997—), 女, 湖北黄冈人, 硕士生, 主要从事雷达干扰技术研究。E-mail: ccs060809@163.com

**引用格式:** 陈楚舒, 盛川, 谢军伟, 等. 非线性频偏 FDA 对测向系统的欺骗研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(3): 70-77.  
CHEN Chushu, SHENG Chuan, XIE Junwei, et al. Research on the Deception of Direction-Finding System based on FDA with Non-Linear Frequency Offset[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(3): 70-77.

与相控阵雷达不同,FDA 可实现具有更高自由度的时间-距离-角度三维相关波束指向<sup>[1-2]</sup>。随着 FDA 研究的深入,涌现出大量关于 FDA 的研究文献<sup>[3-8]</sup>。如何干扰、破坏敌方雷达探测系统的测向、测速以及目标定位过程从而有效掩护我方目标,是雷达电子战研究中的重要课题<sup>[9-10]</sup>。文献[11]从主瓣压制、主瓣欺骗、副瓣压制、副瓣欺骗、组合干扰 5 个方面对干扰机的干扰效果进行了仿真评估。现有文献中较少有关于 FDA 对敌方雷达探测系统干扰效果的研究。文献[12]概述了 FDA 雷达当前的研究现状、发展和成就,及其在电子对抗(Electronic Countermeasures,ECM)和电子反对抗(Electronic Counter-Countermeasure,ECCM)技术领域应用的可能。文献[13]分析了 FDA 对测向时差组合定位系统的干扰效果。文献[14]分析了 FDA 对相邻天线比幅单脉冲测向系统的欺骗效果。但上述文献都是基于采用固定频偏增量的 FDA 结构,没有考虑 FDA 的方向图距离-角度耦合。本文将 4 种非线性的频控函数引入 FDA,在实现方向图距离-角度解耦的基础上,仿真分析了采用非线性频偏的 FDA 对基于相位法测向的干涉仪系统的角度欺骗效果。

## 1 模型假设

图 1 为基本 FDA 的阵列结构<sup>[1]</sup>。

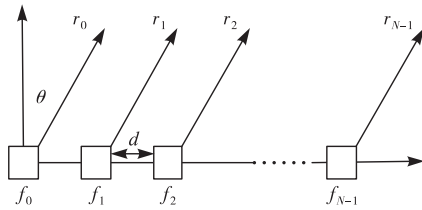


图 1 基本 FDA 的阵列结构

设载波频率为  $f_0$ , 阵元  $n$  的辐射信号频率为:

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

窄带条件下,阵元  $n$  的发射信号表示为:

$$s_n(t) = \exp(j2\pi f_n t), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

阵元  $n$  发射的信号到达远场观测点  $(R, \theta)$  的信号表达式为:

$$s_n(t) = \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{r_n}{c}\right)\right] \quad (3)$$

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。

远场观测点  $(R, \theta)$  处的电场强度的总和为<sup>[1]</sup>:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{R}{c} + \frac{nd\sin\theta}{c}\right)\right] \quad (4)$$

取  $\gamma = \Delta f t + (f_0 d \sin\theta)/c - \Delta f R/c$ , 由于  $f_0 \gg N\Delta f$ , 式(4)可化简为:

$$E = \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi n\gamma) = \frac{\sin(N\pi\gamma)}{\sin(\pi\gamma)} \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \exp[j(N-1)\pi\gamma] \quad (5)$$

取阵列因子  $AF(t, R, \theta)$  为:

$$AF_1(t, R, \theta) = \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{\sin\left[\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]} \quad (6)$$

取相位方向图为:

$$\Phi_1 = \exp\left[j2\pi f_0 \left(t - \frac{R}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j(N-1)\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right] \quad (7)$$

由式(6)可得 FDA 的时间、距离、角度周期性计算公式:

$$t = \frac{R}{c} + \frac{1}{\Delta f} \left(m - \frac{d \sin\theta}{\lambda}\right), \quad m=1,2,\dots,N \quad (8)$$

$$R = ct - \frac{1}{\Delta f} \left(mc - \frac{dc \sin\theta}{\lambda}\right), \quad m=1,2,\dots,N \quad (9)$$

$$\sin\theta = \left(\frac{\lambda}{d}\right)m + \frac{\Delta f}{f_0 d} (R - ct), \quad m=1,2,\dots,N \quad (10)$$

由式(8)~(10)可知,当距离  $R$  和角度  $\theta$  固定时,方向图时间维的最小周期为  $1/\Delta f$ ; 当时间  $t$  和角度  $\theta$  固定时,方向图距离维的最小周期为  $c/\Delta f$ 。

在雷达参数中,波束宽度会对方向图增益的大小产生直接影响,进而影响阵列的扫描范围、阵列孔径等参数的限制条件。与相控阵波束宽度仅与阵元数、阵列孔径及波长相关不同,当波束指向阵列法线方向时,FDA 的波束宽度还与频偏、时间及目标距离有关。由式(6)得归一化的方向性函数:

$$F(t, R, \theta) = \left| \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{N \sin\left[\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]} \right| \approx \left| \frac{\sin\left[N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)\right]}{N\pi\left(\Delta f t + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c}\right)} \right| \quad (11)$$

式(11)为 sinc 函数,当  $\sin x/x = 0.707$  时,  $x = \pm 0.443\pi$ , 由此可求出 FDA 波束的半功率宽度:

$$\theta_{0.5-FDA} = \frac{50.8\lambda}{Nd} - \frac{114.5\Delta f\lambda}{d} \left(t - \frac{R}{c}\right) \quad (12)$$

当  $\Delta f = 0$  时,式(12)等效为相控阵的半功率波束宽度。当目标位于  $R_0, \theta_0$  位置时,FDA 的波束宽度为:

$$\theta_{0.5-FDA} = \left| \frac{50.8\lambda}{Nd \cos\theta_0} - \frac{114.5\Delta f\lambda}{d \cos\theta_0} \left(t - \frac{R-R_0}{c}\right) \right| \quad (13)$$

图2~3分别为二维平面内相控阵与FDA的发射方向图,仿真参数见表1。

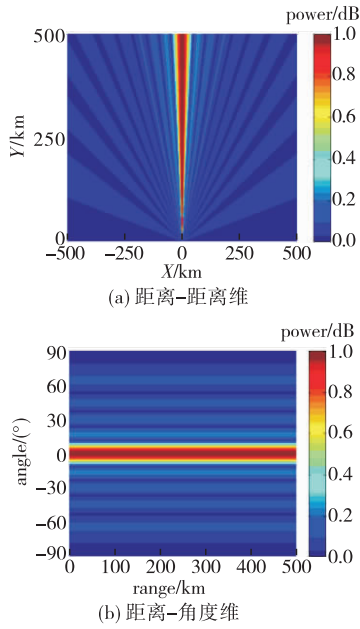


图2 相控阵的发射方向图

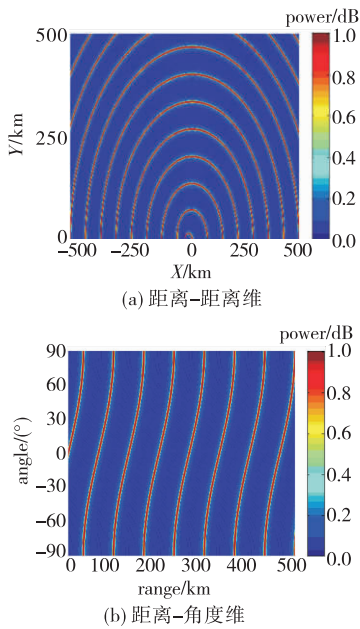


图3 FDA的发射方向图

表1 FDA雷达仿真参数

参数	参数值
阵元数 $N$	20
频偏增量 $\Delta f/\text{kHz}$	4.5
阵元间距 $d/\text{m}$	0.15
基准载频 $f_0/\text{GHz}$	1

图2中,相控阵的波束指向为阵列法线方向。以距离为坐标,FDA的发射方向图为图3(a)中的环型;以角度和距离为坐标,FDA的发射方向图为图3(b)所示的S型。图4为PA与FDA在固定角度位置处其波束指向随距离的变化。由图4可知,PA

的波束指向仅与角度相关而与距离无关,而FDA的波束指向具有距离-角度二维相关性。在同一角度不同距离上FDA的波束指向存在较大偏移,存在对侦查方实施角度欺骗的可能。

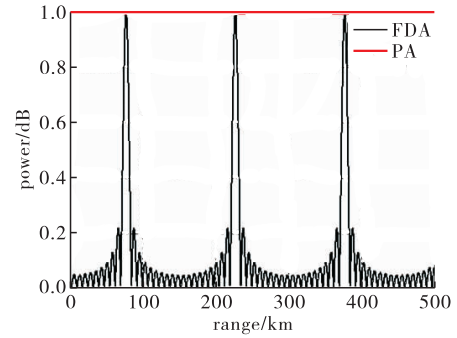


图4 固定位置处PA与FDA的距离维波束指向

## 2 FDA方向图的距离-角度解耦

文献[15]指出FDA发射方向图会出现距离和方位角响应的耦合问题,因而无法利用其无模糊地实现目标距离和方位的二维联合估计。针对如何选择频偏从而改进FDA的阵列性能,文献中展开了大量研究<sup>[16-17]</sup>。

采用非线性频偏增量的情况下,图1的FDA相邻阵元间频偏为 $\Delta f_n$ ,第 $n$ 个阵元的载频为:

$$f_n = f_0 + \Delta f_n, \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (14)$$

则其发射波束方向图可以表示为:

$$p(t, \theta, R) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left\{ -j2\pi \left[ (f_0 + \Delta f_n) \left( t - \frac{r_n}{c} \right) \right] \right\} = \sum_{n=0}^{N-1} \exp \left\{ -j2\pi \left[ \Delta f_n t + f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - \frac{\Delta f_n R}{c} + \frac{n \Delta f_n d \sin \theta}{c} \right] \right\} \quad (15)$$

考虑对阵元间频率进行编码: $\Delta f_n = x_n \Delta f$ ,  $x_n$ 表示编码系数。此时,第 $n$ 个阵元与参考阵元的相位差为:

$$\Delta \phi_n = \phi_0 - \phi_n = \frac{2\pi f_0 n d \sin \theta}{c} - \frac{2\pi x_n \Delta f R}{c} + \frac{2\pi x_n \Delta f d \sin \theta}{c} \quad (16)$$

式中第1项为由距离差引起的传统相控阵的相移量,将式中后2项视为虚拟相移量,令:

$$\frac{2\pi f_0 n d}{c} \sin \theta_0 = \frac{2\pi x_n \Delta f R}{c} - \frac{2\pi x_n \Delta f d \sin \theta}{c} \quad (17)$$

式中: $\theta_0$ 代表实际的波束指向。由于 $f_0 \gg (N-1)\Delta f$ ,省略式(17)右端第2项可得:

$$\frac{2\pi f_0 n d}{c} \sin \theta_0 = \frac{2\pi x_n \Delta f R}{c} \quad (18)$$

从而得到波束指向角 $\theta_0$ 的计算公式:

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{x_n \Delta f R}{f_0 n d}\right) \quad (19)$$

基本 FDA 相当于编码系数  $x_n = n$  的情况。本文 4.2 节中对不同非线性频偏增量形式的 FDA 发射方向图特性展开了对比分析:当  $x_n = \log(n+1)$  时得到对数 FDA(log-FDA),当  $x_n = \sin(n)$  时得到正弦 FDA(sin-FDA),当  $x_n = 1/(n+1)$  时得到倒数 FDA(reciprocal-FDA),当  $x_n = n^2$  时得到平方 FDA(square-FDA)。

### 3 对干涉仪的角度欺骗分析

#### 3.1 基于欧拉公式的 FDA 阵列因子

基于图 1 所示的阵列模型,当采用非线性频偏时,阵元  $n$  的辐射信号频率如式(14)所示。此时,无法通过级数求和得到如式(6)的 sinc 形式的阵列因子。本文通过欧拉公式对式(5)所示的场强进行化简<sup>[18-19]</sup>:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi\varphi_n) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n + j \sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n = \left[ \left( \sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n \right)^2 + \left( \sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ j \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n} \right) \right] \quad (20)$$

式中:

$$\varphi_n = f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin \theta}{c} \quad (21)$$

基于欧拉公式的 FDA 阵列因子为:

$$AF_2(t, R, \theta) = \left| \left[ \left( \sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_n \right)^2 + \left( \sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad (22)$$

式(23)为基于欧拉公式的 FDA 相位方向图:

$$\Phi_2 = \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin \left[ f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin \theta}{c} \right]}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos \left[ f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin \theta}{c} \right]} \right) \quad (23)$$

#### 3.2 FDA 对干涉仪测向的角度欺骗

图 5 的基本干涉仪具有 2 个匹配良好的天线<sup>[18]</sup>。将干涉仪天线接收到的高频信号经与同一本振信号差频后在中频比相,根据得出的相差即可计算出发射机所在的方向。比相器输出的相差与信号到达角的关系为:

$$\psi = \frac{2\pi B \sin \beta}{\lambda} \quad (24)$$

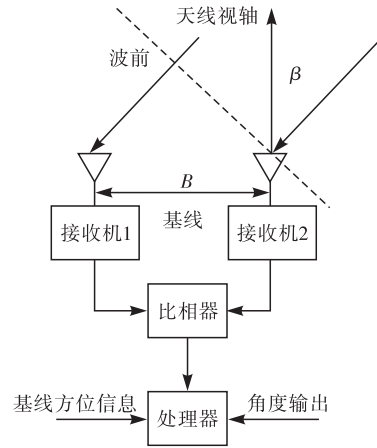


图 5 一维单基线相位干涉仪

根据干涉三角法即可得到信号相对于干涉仪天线视轴的到达角:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\psi \lambda}{2\pi B}\right) \quad (25)$$

干涉仪与图 1 的 FDA 在 X-Y 平面内的位置关系见图 6。

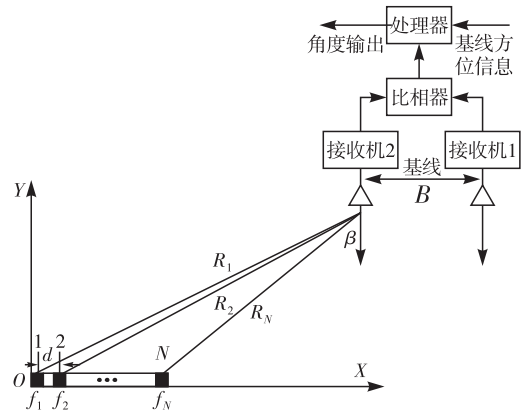


图 6 FDA 与干涉仪的位置关系

电磁波自 FDA 径向传播,远场条件下干涉仪可近似为点目标。设远场条件下干涉仪接收机 2 的坐标为  $(x_G, y_G)$ ,则接收机 1 的坐标为  $(x_G + B, y_G)$ 。根据式(23)可得 FDA 的辐射信号在干涉仪 2 个天线位置处的相位:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_{21} &= \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_{n1}}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_{n1}} \right) \\ \varphi_{n1} &= f_0 \left( t - \frac{R_1}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R_1}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin \theta_1}{c} \\ \Phi_{22} &= \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin \varphi_{n2}}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos \varphi_{n2}} \right) \\ \varphi_{n2} &= f_0 \left( t - \frac{R_2}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R_2}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin \theta_2}{c} \end{aligned} \right. \quad (26)$$

式中:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x_G + B)^2 + y_G^2} \\ \theta_1 = \arctan\left(\frac{y_G}{x_G + B}\right) \\ R_2 = \sqrt{(x_G)^2 + y_G^2} \\ \theta_2 = \arctan\left(\frac{y_G}{x_G}\right) \end{cases} \quad (27)$$

比相器输出的相差为:

$$\psi = \Phi_{22} - \Phi_{21} \quad (28)$$

根据相差可以计算出发射机信号的到达角:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\psi\lambda}{2\pi B}\right) \quad (29)$$

由信号到达角可以进一步计算出虚拟发射机在 X 轴的位置坐标:

$$x = x_G - y_G \tan \beta \quad (30)$$

式中:  $y_G \tan \beta$  为干涉仪计算出的辐射源所在方向与 X 轴交点(即为虚拟发射机位置)到干涉仪距离的绝对值。当  $x_G > y_G \tan \beta$  时,交点在 X 轴正半轴,  $x_1 = x_G - y_G \tan \beta$ ,即为虚拟发射机位置坐标;当

$x_G < y_G \tan \beta$  时,交点在 X 轴负半轴,交点到参考点的距离为  $y_G \tan \beta - x_G$ ,此时交点坐标  $x_2 = -(y_G \tan \beta - x_G) = x_1$ 。根据计算得出的交点位置坐标与 FDA 坐标的比较,即可得出 FDA 的干涉仪角度欺骗效果。

## 4 仿真分析

### 4.1 $\Delta f$ 取值对 FDA 方向图特性的影响

假设目标位于(200 km, 30°),其余仿真参数如表 1 所示。图 7 仿真了  $\Delta f$  取不同值时 FDA 发射方向图特性的不同。图 7 中 4 个子图的距离维最小周期分别为 300 km, 150 km, 100 km, 66.7 km, 可知都符合式(10)中  $T = c/\Delta f$  的结论。当频偏增量  $\Delta f$  的取值增加时,由式(10)可知方向图距离维的周期性增加;由式(13)可知 FDA 的 3 dB 波束宽减小,扫描精度增加。图 7 中存在的多值性问题是由于线性频偏增量  $\Delta f$  与阵元间距  $d$  的线性递增同步导致的。

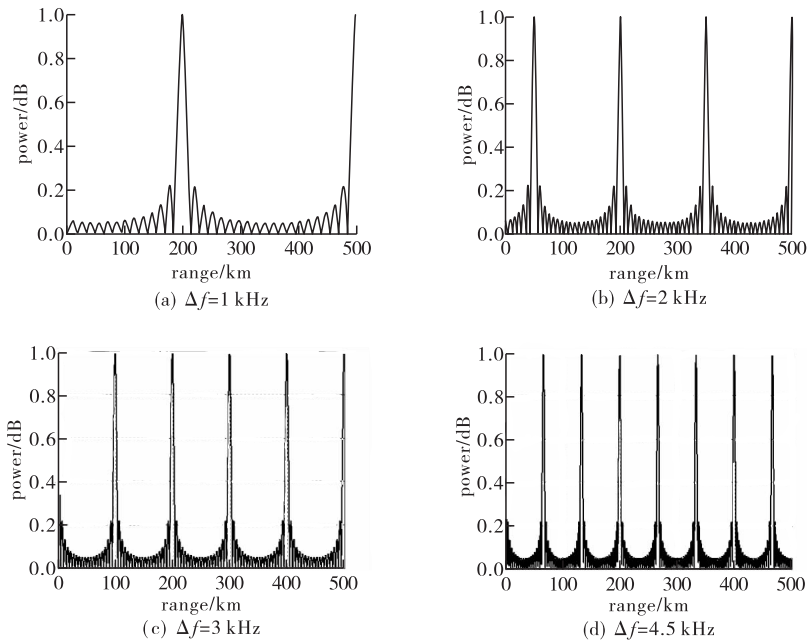


图 7  $\Delta f$  取值对 FDA 距离维周期性的影响

### 4.2 不同非线性频偏 FDA 的发射方向图对比

假设目标位于(200 km, 30°),其余参数见表 1。图 8 中的 FDA 分别采用对数函数、三角函数、倒数函数以及指数函数 4 种不同形式的非线性频偏增量,打破了频偏增量  $\Delta f$  与阵元间距  $d$  的线性递增的同步关系。图 9 对比了相控阵,基本 FDA, sin-FDA, log-FDA, 倒数 FDA 以及平方 FDA 共 6 种阵列在目标位置处的角度维波束宽度,图 10~11 对比

了这 6 种阵列在目标位置处的距离维波束宽度。

图 8(a)和图 8(b)能够在目标位置处形成能量相对集中的“点状”波束,能够消除基本 FDA 发射方向图中的距离-角度耦合。倒数形式的频偏增量文献中较少采用,如图 8(c)所示,由于其波束在距离维上存在较长的拖尾,在实际中的应用价值也较低。图 8(d)的指数形式的频偏增量在远场条件下存在失效的问题<sup>[17]</sup>。由图 9 可知 6 种阵列在目



标位置处的角度维波束宽度完全相等。但在目标位置处的距离维上,如图 10 所示,不同结构的波束形状存在较大差异。其中,相控阵的波束指向与距离无关,在抑制距离相关性干扰方面存在不足;倒数 FDA 波束主瓣在距离维存在较长的拖尾,分辨力较低,实际中应用价值较低;log-FDA 与 sin-FDA 的性能相对较好,后续仿真主要基于这 2 种结构进行。

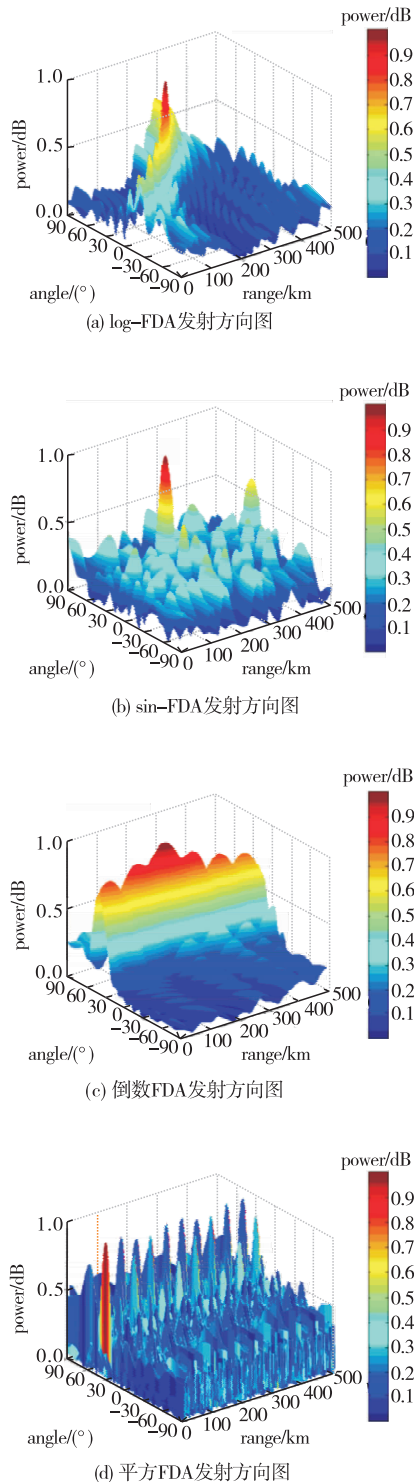


图 8 不同非线性频偏 FDA 的发射方向图

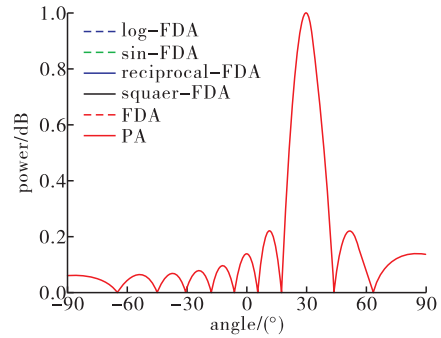


图 9 6 种阵列在目标位置处的角度维波束宽度

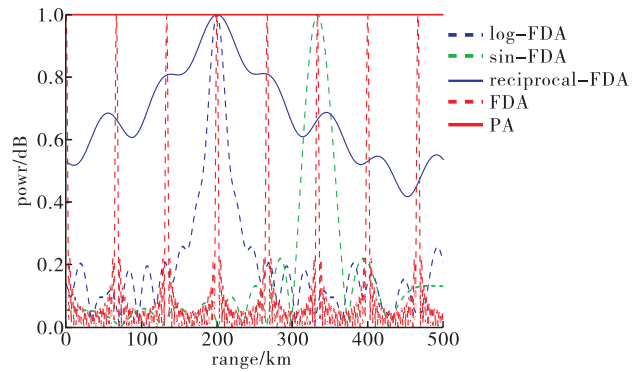


图 10 5 种阵列在目标位置处的距离维波束宽度

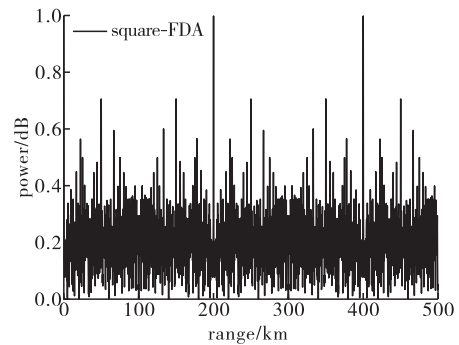


图 11 平方 FDA 在目标位置处的距离维波束宽度

### 4.3 采用不同非线性频偏 FDA 的角度欺骗效果

图 12 仿真了当干涉仪 Y 轴坐标  $y_G = 5$  km, 基线  $B = 0.1$  m, 其余仿真参数见表 1 时, 3 种 FDA 对干涉仪测向的影响。图中横坐标为干涉仪的 X 轴坐标  $x_G$ , 纵坐标为根据干涉仪测向原理得到的虚拟发射机在 X 轴的交点坐标。图 12 中的 2 条红色横线为 FDA 参考阵元(X 轴坐标为 0)及阵元 N(X 轴坐标为  $(N-1)d$ )在 X 轴的坐标, 当虚拟发射机在 X 轴的交点坐标落入这个区域时, 无法对干涉仪测向实现有效的欺骗。基本 FDA 的交点坐标曲线最为平滑, 角度欺骗效果最佳。log-FDA、sin-FDA 的虚拟发射机交点坐标始终在实际阵列位置附近, 偏离量较小。考虑到基本 FDA 方向图中的距离-角度耦合, 后续只对 log-FDA 及 sin-FDA 展开分析。

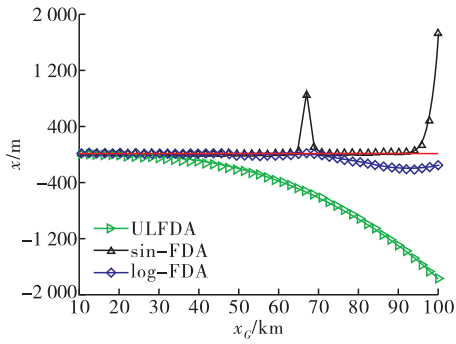


图 12 3 种 FDA 对干涉仪测向的影响( $y_G = 5 \text{ km}$ )

### 4.4 $\Delta f$ 取值对角度欺骗效果的影响

图 13 仿真了当干涉仪 Y 轴坐标  $y_G = 5 \text{ km}$ , 基线  $B = 0.1 \text{ m}$ , 其余仿真参数如表 1 时,  $\Delta f$  取值对干涉仪测向性能的影响。

由图 13 可知, 在一定范围内, FDA 对干涉仪测向的影响随着频偏增量  $\Delta f$  的增大而增强。远场条件下, 虚拟发射机在 X 轴的交点坐标逐渐偏离 FDA 坐标位置, 可以实现有效的角度欺骗, 其中 log-FDA 的影响效果整体上优于 sin-FDA。

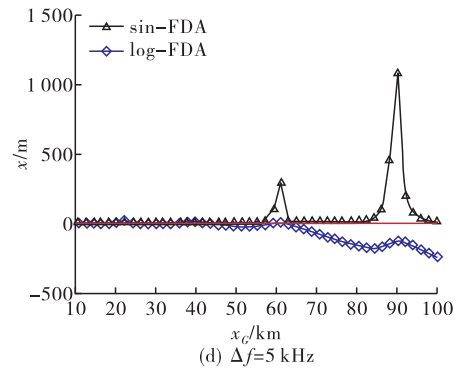
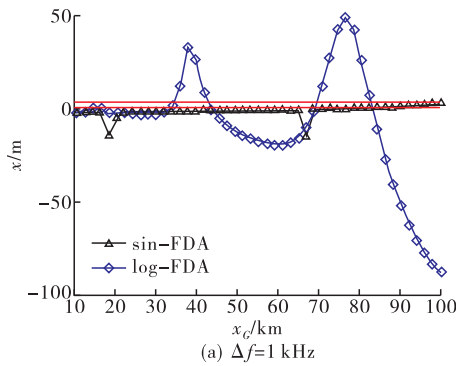


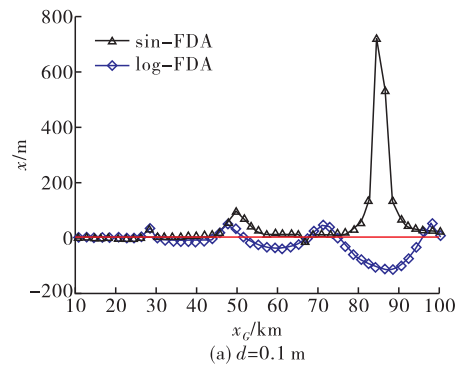
图 13  $\Delta f$  取值对 2 种 FDA 角度欺骗效果的影响

### 4.5 阵元间距对角度欺骗效果的影响

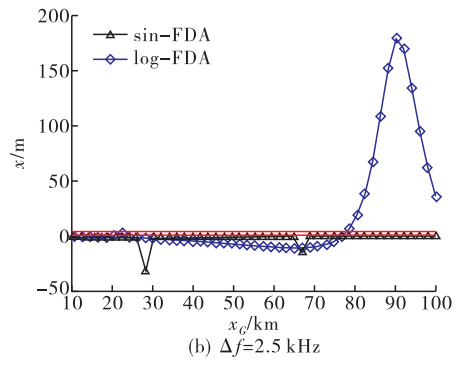
图 14 仿真了当干涉仪 Y 轴坐标  $y_G = 5 \text{ km}$ , 基线  $B = 0.1 \text{ m}$ , 其余仿真参数见表 1 时, 阵元间距  $d$  对干涉仪测向性能的影响。由基准载频  $f_0 = 1 \text{ GHz}$  可知波长  $\lambda = 0.3 \text{ m}$ 。图 14(b)中  $d = 0.45\lambda$ , 阵元  $N$  的 X 轴坐标为 2.565; 图 14(c)中  $d = 0.9\lambda$ , 阵元  $N$  的 X 轴坐标为 5.13; 图 14(d)中  $d = 1.9\lambda$ , 阵元  $N$  的 X 轴坐标为 10.83。由图 14 可知, 阵元间距  $d$  增大时, log-FDA 始终比 sin-FDA 的性能更好, 且 2 种阵列结构在远场位置处的坐标偏移量随着阵元间距  $d$  的增大而增加。



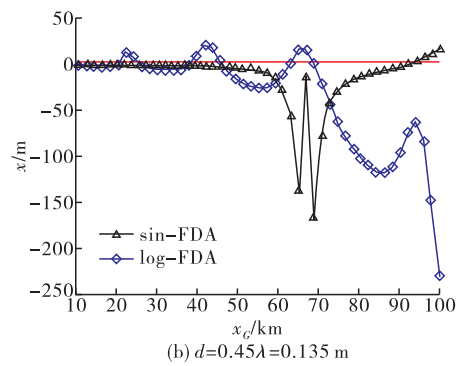
(a)  $\Delta f = 1 \text{ kHz}$



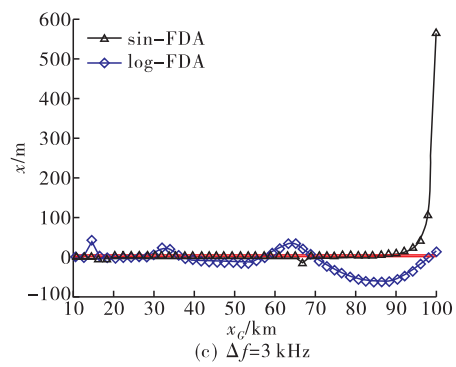
(a)  $d = 0.1 \text{ m}$



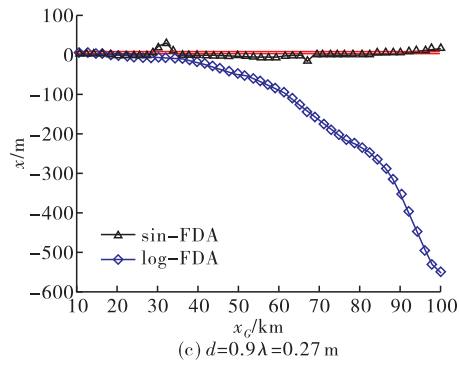
(b)  $\Delta f = 2.5 \text{ kHz}$



(b)  $d = 0.45\lambda = 0.135 \text{ m}$



(c)  $\Delta f = 3 \text{ kHz}$



(c)  $d = 0.9\lambda = 0.27 \text{ m}$

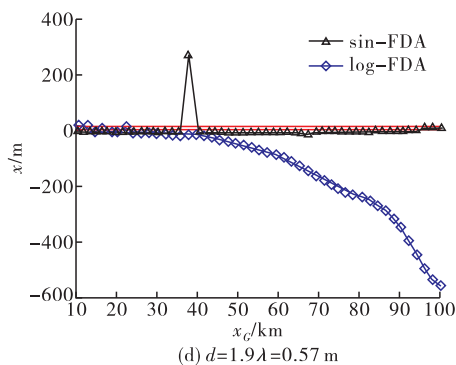


图 14 阵元间距  $d$  对 2 种 FDA 角度欺骗效果的影响

## 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。本文仿真分析了 log-FDA、sin-FDA、reciprocal-FDA 和 reciprocal-FDA 中 log-FDA 与 sin-FDA 能最有效地消除基本 FDA 发射方向图中的距离-角度耦合。进而分析了远场条件下 log-FDA、sin-FDA 可对干涉仪测向产生欺骗。在此基础上,仿真分析了阵列载频和阵元间距这 2 个重要参数对欺骗效果的影响,得出以下结论:FDA 对干涉仪测向的影响随着频偏增量  $\Delta f$  的增大和阵元间距  $d$  增大而增强,且 log-FDA 始终比 sin-FDA 的性能更好。

## 参考文献

- [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.
- [3] JONESA M. Frequency Diverse Array Receiver Architectures[D]. Dayton, USA: Wright State University, 2011.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] POISELRA. Information Warfare and Electronic Warfare Systems[M]. Norwood, USA: Artech House, 2013.
- [10] LIU N J, ZHANG Y T. A Survey of Radar ECM and ECCM[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1995, 31(3): 1110-1120.
- [11] 元亮, 李圳峰, 李鹏, 等. 电子干扰机干扰效果评估[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(1): 4-11.
- [12] AHMED A, HISHAM A, MOHANMMED R, et al. Overview of Frequency Diverse Array in Radar ECCM Applications[C]//International Conference on Communication, Control, Computing, and Electronic Engineering. Khartoum, Sudan: [s. n.], 2017: 1-11.
- [13] 王博, 谢军伟, 葛佳昂, 等. FDA 对测向时差组合定位的欺骗研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 72-78.
- [14] 王博, 谢军伟, 葛佳昂, 等. FDA 对比幅法单脉冲测向的角度欺骗[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(3): 643-650.
- [15] HIGGINS T, BLUNT S D. Analysis of Range-Angle Coupled Beamforming with Frequency-Diverse Chirps[C]//Proceedings of International Waveform Diversity and Design Conference. Kissimmee, FL: [s. n.], 2009: 1-4.
- [16] WANG B, XIE J W, ZHANG J, et al. Dot-Shaped Beamforming Analysis of Subarray-Based sin-FDA[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(10): 1429-1444.
- [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.
- [18] 张永顺, 童宁宁, 赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [19] 葛佳昂, 谢军伟, 张浩为, 等. 频率分集阵列对干涉仪的角度欺骗效果[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 183-191.

(编辑:徐敏)