

# FDA 对测向时差组合定位的欺骗研究

王 博<sup>1</sup>, 谢军伟<sup>1</sup>, 葛佳昂<sup>1</sup>, 张 晶<sup>2</sup>

(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)

**摘要** 针对雷达电子战中,敌方无源探测雷达通过接收干扰机信号实现测向定位,威胁我方干扰机安全的问题,提出一种基于频率分集阵列(FDA)的测向时差组合定位欺骗技术。首先在建立 FDA 阵列模型的基础上,通过欧拉公式得到采用非线性频控函数的 FDA 阵列因子及相位方向图;之后推导了 FDA 阵列作用于干涉仪测得的信号到达角  $\beta$ ;之后,以虚拟干扰机位置与真实位置的欧氏距离  $D$  为评价指标,分析欺骗效果。仿真结果表明,阵列载频位于 L、S 波段的欺骗效果优于 X 波段。在一定参数范围内, $D$  值随着阵列阵元总数、阵列载频的增加而增大。远场条件下,采用正弦及对数频控函数的 FDA 阵列在消除方向图耦合的同时,其定位欺骗的  $D$  值取值在 6~10 km 之间。

**关键词** 频率分集阵列;非线性频偏;干涉仪;欧拉公式;测向时差定位

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.011

**中图分类号** TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0072-07

## Research on Deception Based on Direction Finding Time Difference Positioning System of FDA

WANG Bo<sup>1</sup>, XIE Junwei<sup>1</sup>, GE Jiaang<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. Shaanxi Transportation and Vocational Technology University, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** Aimed at the problems that in the radar electronic warfare, the enemy's passive detection radar can realize the direction finding and positioning by receiving the jammer signals to threaten the safety of our jammer, this paper proposes a direction-based cross-location spoofing technique based on Frequency Divers Array (FDA). Based on the establishment of the FDA array model, the FDA array factor and phase pattern by using nonlinear frequency offset are obtained by Euler's formula. The signal arrival angle  $\beta$  measured by the FDA array on the interferometer is then derived. Then, the Euclidean distance  $D$  of the virtual jammer position and the real position is used as an evaluation index to analyze the fraud effect. The simulation results show that the spoofing effect of the array carrier frequency in the L and S bands is better than that of the X-band. Within a certain parameter range, the  $D$  value increases with the increase of the total number of array elements and the array carrier frequency. Under condition of the far field condition, the FDA array with sinusoidal and logarithmic frequency offset can eliminate the coupling of the beam-pattern, simultaneously the  $D$  value of the positioning fraud is in between 6~10 km.

**收稿日期:** 2019-05-18

**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,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.  
WANG Bo, XIE Junwei, GE Jiaang, et al. Research on Deception Based on Direction Finding Time Difference Positioning System of FDA[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 72-78.

**Key words:** frequency diverse array; nonlinear frequency offset; interferometer; Euler formula; direction finding time difference positioning

相控阵(Phased Array, PA)技术存在不能有效控制发射波束距离指向的问题。2006 年, P. Antonik 将 FDA 阵列作为一种距离-角度二维相关波束形成技术,在雷达会议上首次提出<sup>[1-3]</sup>。与相控阵不同, FDA 阵列通过在阵元间引入一个固定频偏,可以实现具有时间-距离-角度三维相关性的波束指向<sup>[2-4]</sup>。雷达电子战中, FDA 干扰机的辐射信号被敌方预警探测雷达接收后,由于 FDA 阵列方向图的特性,可在敌方雷达对我方干扰机测角及定位的过程中实现有效欺骗,从而有效保护我方干扰机。

2018 年,王文钦教授<sup>[4]</sup>、许京伟博士<sup>[5]</sup>以及陈小龙博士<sup>[6]</sup>发表了多篇关于 FDA 的综述性文章,系统总结了 FDA 的研究现状,分析了 FDA 在射频隐身中的应用前景。Ahmed Abdalla 及唐斌教授等<sup>[7]</sup>系统阐述了基于 FDA 阵列实现干扰抑制的作用机理,指出了 FDA 在多径干扰抑制、有源干扰抑制等方面具有独特的优势。许京伟博士<sup>[8]</sup>利用 FDA-MIMO 发射-接收空间角频率的相对关系进行欺骗干扰鉴别,兰岚<sup>[9]</sup>提出了一种基于 FDA-MIMO 结构的欺骗干扰抑制方法,都取得了较好效果。利用发射方向图的弯曲现象,文献[10]从基本原理上分析了 FDA 阵列对振幅法测向实现角度欺骗的可能性。本文在基于 FDA 阵列特性的干涉仪测向欺骗原理基础上,提出了一种基于 FDA 阵列的测向时差组合定位系统的欺骗技术。

### 1 FDA 阵列结构

$N$  阵元的 FDA 阵列基本结构见图 1<sup>[11-12]</sup> :

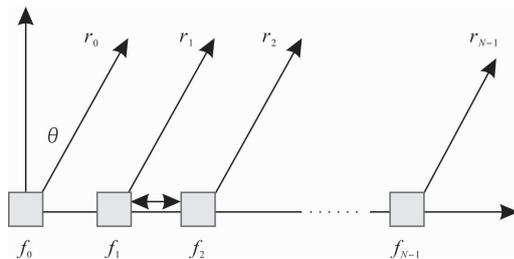


图 1 FDA 阵列基本结构

第  $n$  个阵元的载频为:

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

式中:  $f_0$  为载波频率,通过编码系数  $x_n$  的选择取,可以得采用到不同频控函数的 FDA 阵列:  $x_n = n$  时构成基本 FDA 阵列,  $x_n = \log(n+1)$  时得到对数 FDA 阵列(log-FDA),  $x_n = \sin(n)$  时得到正弦 FDA

阵列(sin-FDA),  $x_n = 1/(n+1)$  时得到倒数 FDA 阵列(reciprocal-FDA)<sup>[13-14]</sup>。

窄带条件下,阵元  $n$  的发射信号为:

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

远场观测点  $(R, \theta)$  所接收的阵元  $n$  的发射信号为:

$$s_n(t) = \exp[j2\pi f_n (t - r_n/c)] \quad (3)$$

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。

其发射方向图可以表示为:

$$p(t, \theta, R) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp\{j2\pi[(f_0 + x_n \Delta f)(t - r_n/c)]\} = \exp[j2\pi f_0 (t - R/c)] \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{j2\pi \left[ x_n \Delta f t + f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - \frac{x_n \Delta f R}{c} + \frac{nx_n \Delta f d \sin \theta}{c} \right]\right\} \quad (4)$$

式中:  $x_n = n$  时,远场观测点  $(R, \theta)$  处的电场强度为<sup>[2-3]</sup>:

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

式中:  $\gamma = \Delta f t + f_0 \frac{d \sin \theta}{c} - \frac{\Delta f R}{c} + \frac{\Delta f d \sin \theta}{c}$ 。取其阵列因子  $AF(t, R, \theta)$  为:

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

取其相位方向图为:

$$\Phi_1 = \exp[j2\pi f_0 (t - R/c)] \times \exp[j(N-1)\pi(\Delta f t + f_0 d \sin \theta/c - \Delta f R/c)] \quad (7)$$

### 2 FDA 干扰机对相位法测角的欺骗

#### 2.1 基于欧拉公式的 FDA 阵列因子

当编码系数  $x_n$  采用非线性函数形式时,无法通过级数求和得到式(6)所示的 sinc 形式阵列因子。本节考虑通过欧拉公式对式(5)进行化简<sup>[15]</sup>:

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j2\pi\varphi_n) = \sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_n + j \sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_n =$$

$$\left[ \left( \sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_n \right)^2 + \left( \sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[ j \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_n}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_n} \right] \quad (8)$$

式中:

$$\varphi_n = f_0 \left[ t - \frac{R}{c} \right] + \Delta f_n \left[ t - \frac{R}{c} \right] + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} \quad (9)$$

根据式(8)可得式(10)所示的基于欧拉公式的 FDA 阵列因子,以及式(11)所示的基于欧拉公式的 FDA 阵列相位方向。

$$AF_2(t, R, \theta) = \left| \left[ \left( \sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_n \right)^2 + \left( \sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad (10)$$

$$\Phi_2 = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin \left[ f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} \right]}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos \left[ f_0 \left( t - \frac{R}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin\theta}{c} \right]} \quad (11)$$

### 2.2 FDA 阵列对干涉仪测向的角度欺骗

干涉仪通过将天线接收到的高频信号与同一本振信号差频后在中频比相,根据计算得到的相差即可得出信号源所在方向。假设干涉仪与 FDA 阵列在 X-Y 平面内的位置关系见图 2<sup>[16]</sup>。

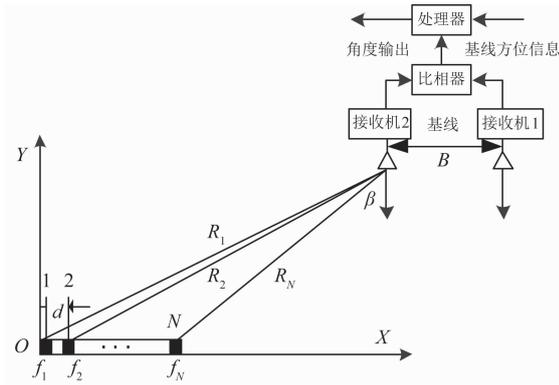


图2 FDA 阵列与干涉仪的位置关系

远场条件下,将干涉仪近似为点目标,其天线接收到的辐射信号可近似为平面波。假设接收机 2 的坐标为  $(x_G, y_G)$ ,则接收机 1 的坐标为  $(x_G + B, y_G)$ 。干涉仪比相器输出相差与信号到达角的关系为  $\psi = 2\pi B \sin\beta / \lambda$ ,从而有  $\beta = \arcsin(\psi\lambda / 2\pi B)$ 。

由式(10)~(11)可得干涉仪比相器输出的相差为:

$$\psi = \Phi_{22} - \Phi_{21} \quad (12)$$

式中: $\Phi_{21}$ 和 $\Phi_{22}$ 分别为天线 1、2 测得的信号相位。

$$\begin{cases} \Phi_{21} = \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_{n1}}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_{n1}} \right) \\ \varphi_{n1} = f_0 \left( t - \frac{R_1}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R_1}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin\theta_1}{c} \\ \Phi_{22} = \arctan \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin\varphi_{n2}}{\sum_{n=0}^{N-1} \cos\varphi_{n2}} \right) \\ \varphi_{n2} = f_0 \left( t - \frac{R_2}{c} \right) + \Delta f_n \left( t - \frac{R_2}{c} \right) + \frac{f_0 d \sin\theta_2}{c} \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x_G + B)^2 + y_G^2} \\ \theta_1 = \arctan(y_G / (x_G + B)) \\ R_2 = \sqrt{x_G^2 + y_G^2} \\ \theta_2 = \arctan(y_G / x_G) \end{cases} \quad (14)$$

最终,干涉仪测得的到达角  $\beta$  为:

$$\beta = \arcsin(\psi\lambda / 2\pi B) \quad (16)$$

### 3 FDA 对测向时差组合定位的欺骗

当我方干扰机掩护作战飞机突防时,干扰机的辐射信号不可避免地会被敌方预警探测雷达所捕获,敌方双站无源探测系统可通过测向时差组合定位技术解得干扰机的位置信息。图 3 所示为 X-Y 平面内基于 2 个观测站的测向时差组合定位原理图<sup>[17-18]</sup>。

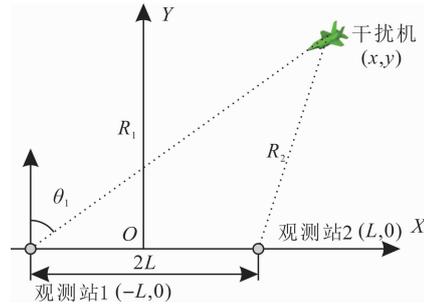


图3 测向时差组合定位原理图

为简化计算,建立如图 3 所示的坐标系,2 个观测站之间的间距为  $2L$ ,观测站 1 的坐标为  $(-L, 0)$ ,观测站 2 的坐标为  $(L, 0)$ ,FDA 干扰机位于  $(x, y)$  位置。观测站 2 通过一个全向天线接收干扰机辐射信号,之后通过定向天线转发给观测站 1;观测站 1 通过干涉仪测得干扰机辐射信号的到达角  $\theta_1$ ,同时通过另一个天线接收观测站 2 的转发信号,并测量与到达观测站 1 的同一个信号的时间差  $\Delta t_{12}$ 。易知:

$$\Delta t_{12} = (R_2 + 2L - R_1) / c =$$

$$(\sqrt{(x-L)^2 + y^2} + 2L - \sqrt{(x+L)^2 + y^2}) / c \quad (16)$$

式中: $R_1$ 、 $R_2$  分别表示观测站 1、2 到干扰机的距离。

再根据余弦定理可知:

$$R_1 = \frac{c\Delta t_{12}(2L - c\Delta t_{12}/2)}{c\Delta t_{12} - 2L(1 - \sin\theta_1)} \quad (17)$$

综上,根据信号到达角  $\theta_1$  及斜距  $R_1$  即可实现对 FDA 干扰机的定位。

由第 2 节的分析可知,FDA 干扰机会对观测站 1 测量的信号到达角  $\theta_1$  产生角度欺骗,如图 4 所示,假设测向偏差为  $\Delta\theta$ ,则组合时差定位系统得到的虚拟干扰机位置与真实位置的欧氏距离为:

$$D = \left| 2R_1 \sin \frac{\Delta\theta}{2} \right| \quad (18)$$

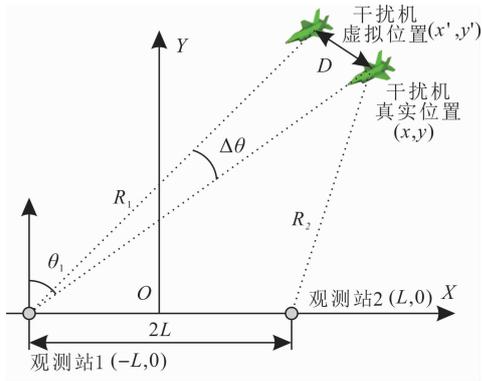


图 4 测向时差组合定位偏差

### 4 仿真分析

为验证本文结论的正确性,仿真分析 FDA 阵列对测向时差组合定位系统的欺骗效果。

**仿真 1:** FDA 干扰机位置坐标  $(x, y)$ 、阵列载频  $f_0$  对定位系统的欺骗影响。

本例中取 FDA 阵元总数  $N=30, \Delta f=1 \text{ kHz}, d=0.15 \text{ m}$ , 2 个观测站的间距为 2 km, 阵列载频  $f_0$  与干扰机空间坐标  $(x, y)$  对测向时差组合定位的欺骗效果如图 5~6 所示。图 5 中阵列载频位于 L、S 波段, 图 6 中阵列载频位于 X 波段。

综合分析图 5~6 可知,当列载频位于 L、S 波段时,其欺骗效果优于 X 波段。在一定范围内,阵列载频  $f_0$  取值越大,则虚拟干扰机位置与真实位置的间距  $D$  越大,越有利于实现 FDA 干扰机对测向时差组合定位系统的欺骗。当干扰机  $x$  轴坐标确定时,随着干扰机  $y$  轴坐标的增大,观测站 1 测得的信号达到角  $\theta_1$  减小,干扰机虚拟位置与真实位置的间距  $D$  增大。当干扰机  $y$  轴坐标确定时,随着干扰机  $x$  轴坐标的变化,  $D$  值先减小,后逐渐增大,最终趋于定值,性能凹口出现在  $\theta_1 = 45^\circ$  位置附近。

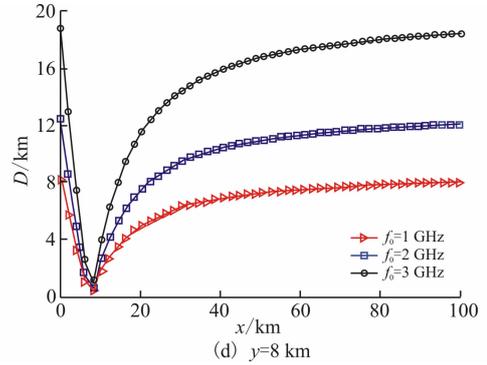
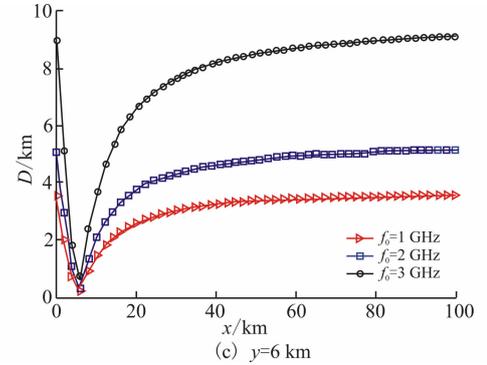
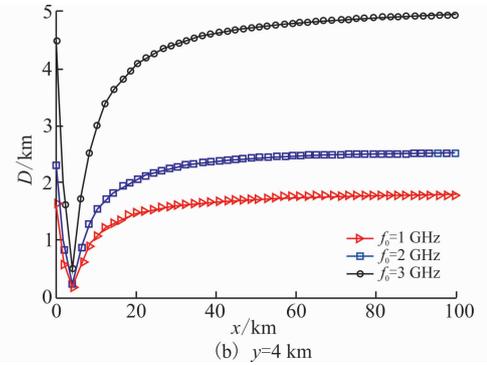
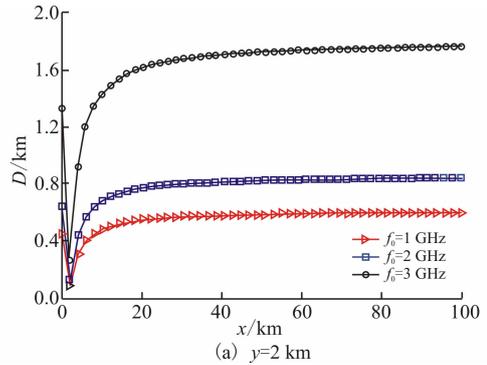
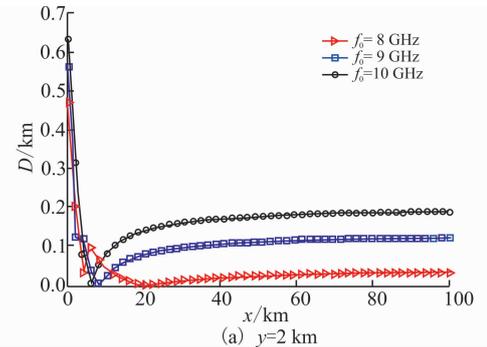


图 5 干扰机位置、阵列载频  $f_0$  对定位系统的欺骗影响



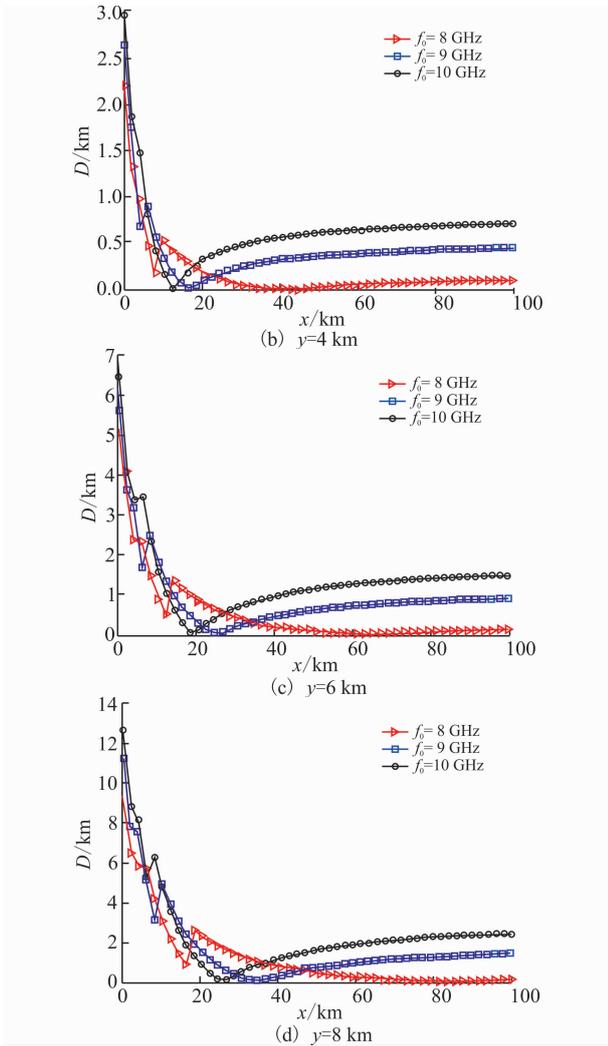


图6 干扰机位置、阵列载频  $f_0$  对定位系统的欺骗影响

**仿真 2:** 阵元数  $N$  及阵元间距  $d$  对定位系统的欺骗影响。

本例中取  $(x, y) = (100 \text{ km}, 6 \text{ km})$ , 阵列载频  $f_0 = 1 \text{ GHz}$ ,  $\Delta f = 1 \text{ kHz}$ , 两观测站的间距为  $2 \text{ km}$ 。取  $d = 0.15 \text{ m}$ , 改变 FDA 阵元数目  $N$  得到图 7, 取  $N = 30$ , 改变 FDA 阵元间距  $d$  得到图 8。综合比较可知, 相同参数条件下, 随着 FDA 阵列阵元数目增加, 虚拟干扰机位置与真实位置的间距  $D$  逐渐减小, FDA 干扰机对测向时差组合定位系统的欺骗效果变差, 性能凹口出现在  $\theta_1 = 45^\circ$  附近。而阵元间距  $d$  的改变对远场条件下的定位欺骗效果没有影响。

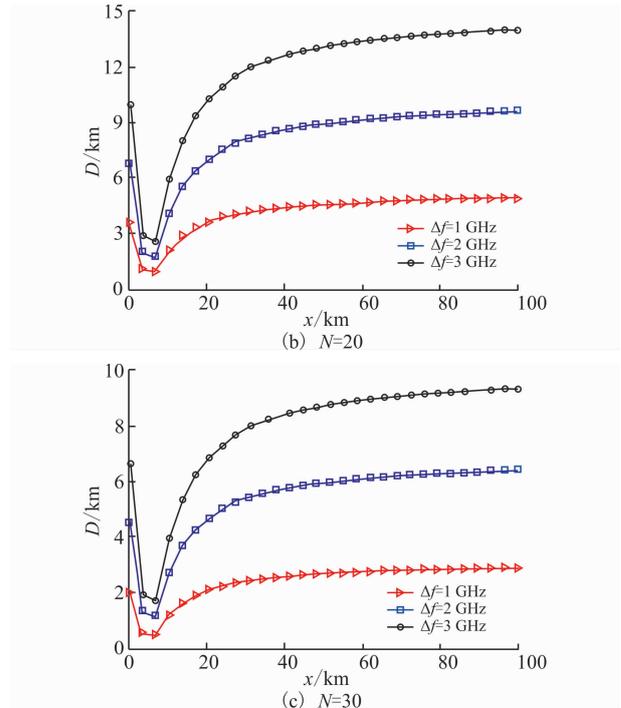
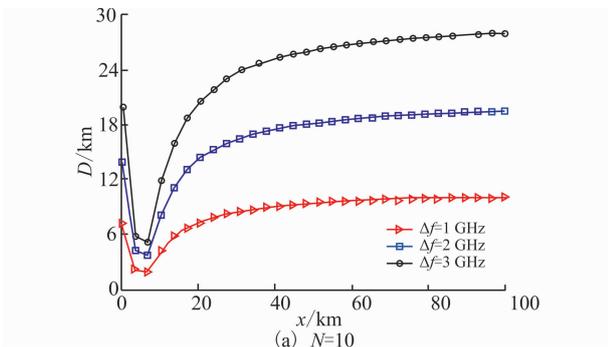


图7 FDA 阵元数目  $N$  对定位系统的欺骗影响

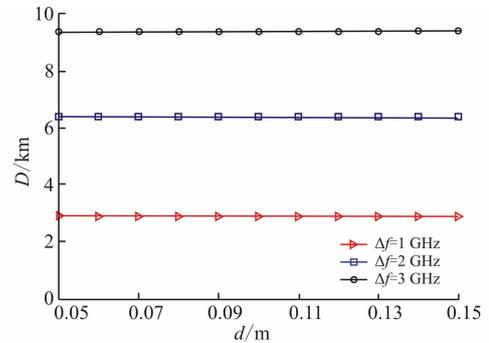


图8 FDA 阵元间距  $d$  对定位系统的欺骗影响

**仿真 3:** 采用不同频控函数 FDA 阵列发射方向图对比。

本例中假设目标位于  $(60 \text{ km}, 30^\circ)$ ,  $\Delta f = 6 \text{ kHz}$ ,  $d = 0.15 \text{ m}$ ,  $f_0 = 1 \text{ GHz}$ , 元数目  $N = 30$ , 2 个观测站的间距为  $2 \text{ km}$ 。图 9 分别为基本 FDA 阵列, log-FDA, sin-FDA 及 reciprocal-FDA 的发射方向图。

图 9(b)~(d) 能够在目标位置处形成能量相对集中的“点状”波束, 能够消除图 9(a) 基本 FDA 阵列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 9(d) 所示, 由于其波束在距离维上存在较长的拖尾, 分辨率较低, 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 种阵列结构进行<sup>[19-20]</sup>。

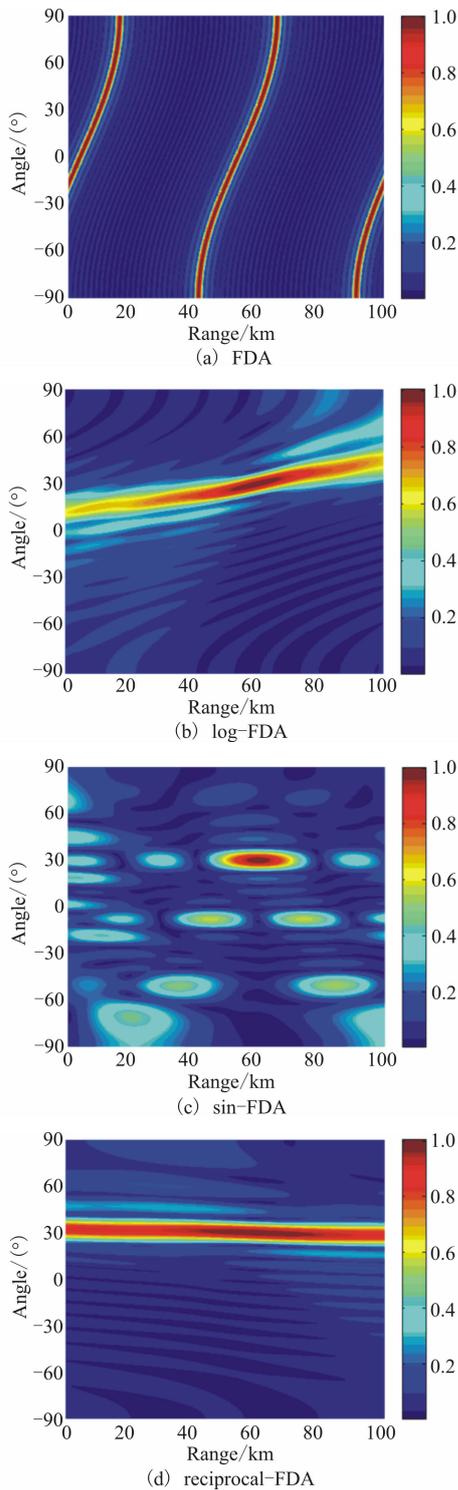


图 9 采用不同频控函数 FDA 阵列的发射方向图

**仿真 4:**采用不同非线性频控函数 FDA 阵列的定位欺骗效果。

本例中取 FDA 阵元总数  $N = 30$ ,  $\Delta f = 1$  kHz,  $d = 0.15$  m, 2 个观测站的间距为 2 km, 干扰机的  $y$  轴坐标  $y = 2$  km, 对采用正弦与对数 2 种非线性频控函数 FDA 阵列的载频  $f_0$  与干扰机空间坐标  $(x, y)$  对测向时差组合定位的欺骗效果展开分析, sin-FDA 的欺骗效果见图 10(a), log-FDA 的欺骗效果见图 10(b)。

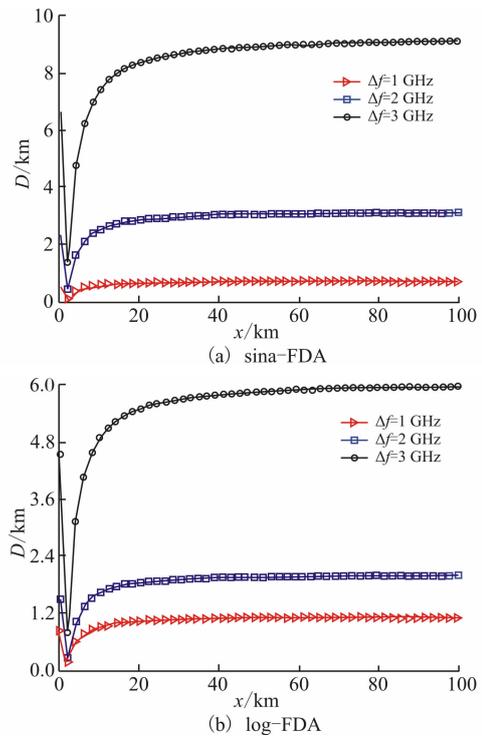


图 10 采用非线性频控函数 FDA 阵列的定位欺骗效果

由图 10 与图 5(a)对比可知,采用非线性频控函数的 FDA 阵列在消除基本 FDA 阵列方向图中的距离-角度耦合的同时,其对测向时差组合定位系统的欺骗效果也更为理想。

### 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 FDA 阵列波束指向的距离-角度相关特性,在分析 FDA 阵列对干涉仪测角系统欺骗原理的基础上,提出了一种基于 FDA 阵列的测向交叉定位的欺骗方法。由仿真结果可知,远场条件下,通过合理选择 FDA 阵列参数,可对测向交叉定位结果产生有效的欺骗。同时,基于非线性频控函数的 FDA 阵列在有效消除方向图中距离-角度耦合的同时,具有更为良好的定位欺骗效果。

### 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, 2006: 215-217.
- [2] JONES A M. Frequency Diverse Array Receiver Architectures [D]. Dayton, OH, USA: Wright State University, 2011.
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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. Frequency Diverse Array Radar Signal Processing via Space-Range-Doppler Focus (SRDF) Method [J]. Journal of Radars, 2018, 7(2): 183-193. (in Chinese)
- [7] ABDALLA A, ABDALLA H, RAMADAN M, 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.
- [8] XU J W, LIAO G S, ZHU S Q, et al. Deceptive Jamming Suppression with Frequency Diverse MIMO Radar [J]. Elsevier Journal of Signal Processing, 2015, 113(8): 9-17.
- [9] LAN L, LIAO G S, XU J W. A Method to Suppress the Main-Beam Deceptive Jamming in FDA-MIMO Radar with Random Polyphase Codes [C]//2018 IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. [S. l.]: IEEE, 2018: 509-513.
- [10] 胡祺勇, 谢军伟, 张昭建. 频率分集阵列在角度欺骗中的应用分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(6): 41-47.  
HU Q Y, XIE J W, ZHANG Z J, Application and Analysis of Frequency Diverse Array Used in Angle Deception [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2016, 10(6): 41-47. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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): 153-166.  
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): 153-166. (in Chinese)
- [14] 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): 42-48.  
WANG B, XIE J W, ZHANG J, et al. Modeling and Research of Ambiguity Function Based on Subarray-Based FDA [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(4): 42-48. (in Chinese)
- [15] 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.  
GE J A, XIE J W, ZHANG H W, et al. Angle Deception Effect of Frequency Diversity Array on Interferometer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 183-191. (in Chinese)
- [16] 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.  
ZHANG Y S, TONG N N, ZHAO G Q. Principles of Electronic Warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [17] RICHARDS M. 雷达信号处理基础 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
RICHARDS M. Fundamentals of Radar Signal Processing [M]. 2nd Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 122-126. (in Chinese)
- [18] 丁璐飞. 雷达原理 [M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 477-488.  
DING L F. Radar Principle [M]. 4th Ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 477-488. (in Chinese)
- [19] 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 Diverse Array Beam pattern [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [20] 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 Technology and Its Applications of Frequency Diverse Array [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)