

频率分集阵列在角度欺骗中的应用分析

胡祺勇, 谢军伟*, 张昭建

(空军工程大学防空反导学院,西安,710051)

摘要 针对传统相控阵雷达易被干扰机侦察到方位信息从而实施干扰的问题,提出了一种基于 FDA(频率分集阵列)的角度欺骗方法。通过在阵元间设定微小的线性频率差,将距离引入到 FDA 方向图函数,使得不同距离上的电磁波能量分布呈现弯曲特性,形成“虚拟辐射源”,进而达到对侦察接收机的角度欺骗目的。此外,在分析欺骗原理的基础上,探究了频率差因子、阵元间距因子对欺骗的影响效果。Matlab 仿真结果表明,在设定合适的因子后,对于特定距离处的目标该方法角度欺骗效果可达 90° 。

关键词 频率分集阵列;频率差;角度欺骗;方向图函数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.009

中图分类号 TN973.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0047-05

Application and Analysis of Frequency Diverse Array Used in Angle Deception

HU Qiyong, XIE Junwei, ZHANG Zhaojian

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

Abstract: Aimed at the problem that the reconnaissance receiver easily detects the information in direction of the conventional phased array radar and jams, an angle deception method based on FDA (Frequency Diverse Array) is proposed. This paper applies a small linear frequency shift is applied from channel-to-channel, resulting in FDA pattern function related with range between channels to make electromagnetic wave power bend in different ranges, thus forming a virtual radiation source, and achieving the goal of angle deception aimed at reconnaissance receiver. In addition, based on the analysis of deception principle, the paper discusses the deception effects of frequency offset and space between channels. The results of Matlab simulation show that by this method the angle deception can reach up to 90 degrees at specific ranges when some factors are properly fixed.

Key words: frequency diverse array; frequency offset; angle deception; pattern function

在传统的相扫阵列中,每个阵元的辐射频率相同,雷达通过控制移相器相移量来改变相邻阵元间

的激励相位,从而实现波束的空间扫描。因此,波束的指向完全由移相器的相移量决定,而与场点距离

收稿日期:2016-04-26

基金项目:航空科学基金(20152096019; 20145596025)

作者简介:胡祺勇(1993—),男,湖北天门人,硕士生,主要从事武器系统总体技术与作战运用研究。E-mail: 2530995685@qq.com

* 通信作者:谢军伟(1970—),男,河南许昌人,教授,博士生导师,主要从事武器系统总体研究。E-mail: xjw_xjw_123@163.com

引用格式: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):47-51. HU Qiyong, XIE Junwei, ZHANG Zhaojian. Application and Analysis of Frequency Diverse Array Used in Angle Deception[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 47-51.

无关。在这种模式下,空间电磁波能量的分布情况与波束指向保持一致,均沿径向传播^[1],容易被干扰机侦察到雷达辐射源的方向从而实施干扰。因此,研究一种电磁波能量指向可随距离变化的新型阵列具有重要的现实意义。

2006年,频率分集阵列(Frequency Diversity Array, FDA)^[2-3]的概念在国际雷达会议上首次被提出,引起了人们的广泛关注。与传统的相扫阵列不同, FDA突破了传统的相控阵列对移相器的依赖,通过在各阵元中心频率基础上引入微小线性频率差^[4-6],使得场强成为距离、角度、时间的函数^[7],从而实现距离对能量指向的控制,并最终得到波束在空间的扫描效果^[8]。文献[9]建立验证了频率分集阵列的信号仿真模型,推动了相关理论的研究。文献[10]对频率分集阵列雷达的使用性能作了深入研究。文献[11]提出了利用频率分集阵列雷达中目标的距离依赖性对其进行测距的应用。

1 基本原理

1.1 FDA基本原理

对于传统的 N 阵元的相扫阵列,假定阵元馈线输入端等幅馈电,忽略阵元到空间远区某点上的微小差别对振幅的影响,以一号阵元辐射场的相位为基准,则该点的场强为:

$$E(\theta) = E \sum_{i=1}^N e^{j i (k d \sin \theta - \varphi)} \quad (1)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数; d 为相邻阵元距离; θ 为场点偏离阵面法线方向; $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda d \sin \theta_0}$ 为相邻阵元激励电流的相位差; E 为辐射场的振幅。

空间远场区某点的场强归一化方向性函数为:

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin \left[\frac{\pi N d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \right| \quad (2)$$

式(2)表明在 θ 方向上,各阵元场强同相相加,使得该方向场强强度最大。空间波束指向 θ_0 与距离无关,改变 φ 实现 θ_0 改变,控制波束扫描。

相比于相控阵雷达, FDA不需要移相器,在中心频率 f_1 上对相邻阵元引入微小频率差 Δf ,其它假设不变,对远场区某点,阵元 i 电场矢量为:

$$E_i = e_{\theta} j \frac{60 I_i}{r_i} F_i(\theta) e^{-j k_i r_i} \quad (3)$$

式中: $I_i = I e^{j 2\pi f_i t}$ 为阵元 i 的激励电流; $F_i(\theta) =$

$\frac{\cos(k l \cos \theta) - \cos(k l)}{\sin \theta}$ 为元因子; $k_i = \frac{2\pi f_i}{c}$,为波数; r_i 为阵元 i 至远场区观测点的距离。

在远区,振幅项中 $\frac{1}{r_i}$ 近似相等;相位项中 $r_i \approx r_1 - (i-1)d \sin \theta$,阵元 i 在远区的场强为:

$$E_i = E_1 \cdot \exp \{ j [(i-1) 2\pi \Delta f t + k_1 d \sin \theta - \Delta k r + (i-1) \Delta k d \sin \theta] \} \quad (4)$$

对 N 阵元的均匀线性 FDA,空间远区某点的场强可表示为:

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^N E_i \quad (5)$$

由此得到 FDA 的归一化方向性函数为:

$$F(\theta) = \left| \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin \frac{N\phi}{2}}{\frac{\sin \phi}{2}} \right| \quad (6)$$

式中: $\phi = 2\pi \Delta f t + k_1 d \sin \theta - \Delta k r_1$ 。

分析式(6)可知, FDA 方向图函数不仅与频偏 Δf 有关,还是距离 r_1 和时间 t 的函数。

为方便分析,不考虑时间,令 $t=0$,则:

$$\phi = k_1 d \sin \theta - \Delta k r_1 \quad (7)$$

1.2 侦察接收机测向原理

侦察接收机对雷达辐射源的测向就是测量雷达电磁波信号的等相位波前方向,通常分为振幅法测向和相位法测向。

采用振幅法原理的测向天线系统对不同方向到达的电磁波具有的不同振幅特性,利用这点,侦察接收机完成对雷达辐射源的测向工作。实际工作中,测向天线以一定的波束宽度和扫描速度对某一空域进行连续扫描,雷达辐射源的脉冲串幅度值会被测向天线的方向图函数所调制。当测向天线检测到信号幅度值高于、低于检测门限时,分别记下相应的波束指向 θ_1 和 θ_2 ^[12],则认为等相位波前的方向为:

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (8)$$

考虑到天线方向图是对称的,因此脉冲串的中心位置即为雷达辐射源方向。

采用相位法原理的测向天线系统根据多个天线所接收到回波信号之间的相位差进行测角,天线测得的波达方向即是同相波前的方向。对于远区目标,雷达辐射的电磁波近似为平面波,因此,设两天线间距为 l ,则接收到的信号由于存在波程差 ΔR 而产生相位差 ψ ,其值为:

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \theta \quad (9)$$

利用相位计进行比相,测出相位差,即可确定辐

射源方向。

2 FDA 角度欺骗原理

分析式(2)可知,当阵元参数取定后,相控阵列的空间波束指向与距离无关,而由式(6)得到,FDA的归一化方向图是距离的函数,主波束指向会随着距离的改变而发生变化,反映在能量域上即为空间波束主瓣能量由于场强的干涉效应呈现弯曲。考虑到振幅法测向天线以到达电磁波的振幅响应来测量辐射源的方向,利用 FDA 这种虚拟辐射源特性,可以实现对侦察接收机的角度欺骗。

如前所述,各阵元辐射电磁波在场强干涉点处同相叠加,等相位波前出现在干涉点处。结合式(7)可知,相位是距离的函数,在不同的距离处,等相位波前方向会呈现不同程度的倾斜。在阵面处,同相波前倾斜极小;随着距离增加,同相波前倾斜加大。因此,对于侦察接收机,这种波前的距离特性形成了虚拟辐射源。鉴于相位法测向天线以信号的波达方向作为辐射源方向,因此,可实现角度欺骗。

现以标准均匀线性阵列为例,对 FDA 角度欺骗进行说明。阵列阵元数 N 为 7,发射信号载频 f_0 为 1 GHz,阵元间距 d 为 0.45λ ,频率差 Δf 为 200 Hz。假设阵元辐射各向同性,且相互之间无电磁耦合现象,则 FDA 的归一化方向图见图 1。从图 1 中可以看出,主波束的指向随着距离增加发生了偏移。显然,当 FDA 主瓣波束对空间扫描时,侦察接收机测出的将是虚拟辐射源的方向,而非真实雷达的方位。

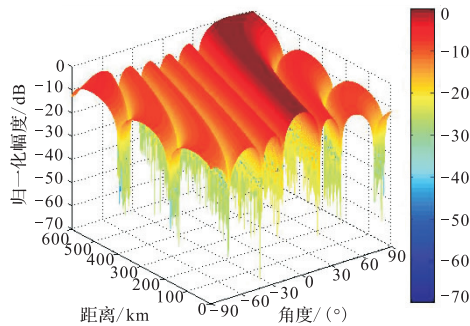


图 1 FDA 归一化方向图
Fig.1 FDA normalized pattern

3 不同因子的影响效果分析

3.1 频率差的影响效果

分析式(7),可知频率差增大,有利于角度欺骗,在较短的距离上就可以得到更大的欺骗效果。同时,还应注意, FDA 方向图呈现周期性变化:

$$\varphi = k_0 d \sin\theta - \Delta k r_0 = m\pi \quad (10)$$

式中: m 为整数。

由式(10)得到距离周期为:

$$R_T = \frac{c}{\Delta f} \quad (11)$$

式(11)说明 R_T 只与 Δf 有关。

由于存在周期性,波束指向经过一个距离周期后,会再次指向相同的方向,由此带来距离模糊,随着频率差增大,第一模糊距离的值会减小,波束宽度会展宽,这将限制雷达的作用距离和测角精度。因此,频率差选取不宜过大。

3.2 阵元间距的影响效果

式(10)中,指定频率差和距离为定值,则波束指向是阵元间距函数,考察阵元间距对角度欺骗的影响效果。推广距离相关波束^[13]概念,定义此类函数为阵元间距相关波束函数。得到角度周期为:

$$\Theta_T = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right) \quad (12)$$

式(12)说明 Θ_T 只与 $\left(\frac{d}{\lambda}\right)$ 有关。

角度周期会使方向图中产生栅瓣,使测角出现多值问题,同时使得波束能量分散。因此,实际中应综合考虑阵元间距,避免出现栅瓣。

4 仿真实验

如前所述,距离会影响波束偏离阵面法线角度。图 2 是距离的角度欺骗效果图,从中可知,在 50 km 处,角度偏离 4.29° ;在 300 km 处,偏离更明显,达到 29.36° ,这与(6)式的分析结果是吻合的。根据测向原理,以上角度即为相应距离处的接收机测得辐射源方位。实际上,雷达实际位置角度为 0° ,由此到达了角度欺骗目的。结合图 1,随着距离增加,波束指向变化更大,但波束宽度也会明显变宽,导致天线增益下降,测角误差增加,因此, FDA 的作用距离通常取在合理范围内。

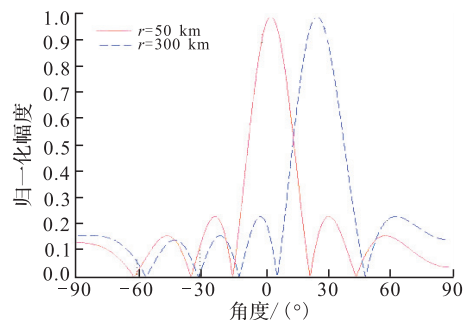


图 2 距离的角度欺骗效果
Fig.2 Angle deception effects of range

频率差影响波束指向和模糊距离。图3是距离为100 km的频偏相关波束图^[14],可以看出,随着频率差的增加,波束指向偏离阵面法线的角度增大,波束宽度展宽,当频率差增大到1 350 Hz时,波束指向偏离角度达到90°;图4是频率差为500 Hz的距离相关波束图,图5是频率差为1 000 Hz时的距离相关波束图,方向图呈现出了明显的周期性变化,也即出现距离模糊,第一模糊距离分别为600 km、300 km,第一模糊距离随着频率差的增大而减小,这与前文的分析结果相符。因此,尽管增大频率差有利于提高角度欺骗性,但为避免出现距离模糊,频率差应根据雷达的最远作用距离选择。

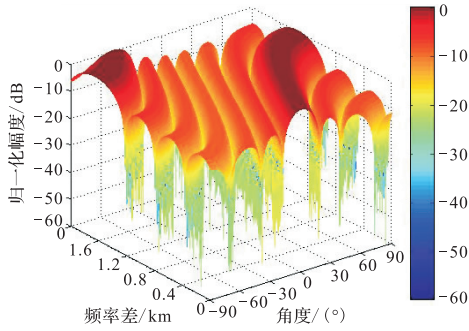


图3 距离为100 km的频偏相关波束图

Fig.3 Beam pattern of frequency deviation at range of 100 km

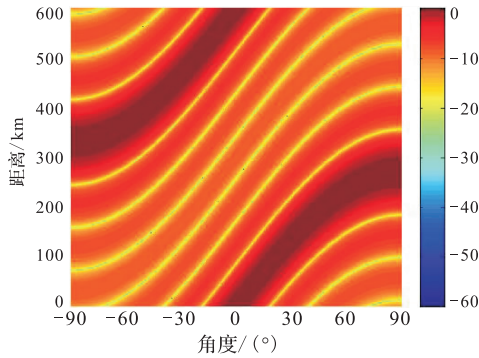


图4 频率差为500 Hz的距离相关波束图

Fig.4 Beam pattern of range at frequency offset of 500 Hz

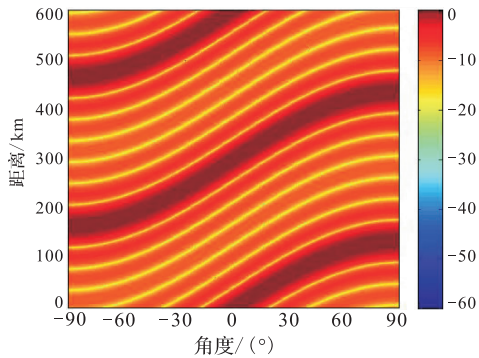


图5 频率差为1 000 Hz的距离相关波束图

Fig.5 Beam pattern of range at frequency offset of 1 000 Hz

阵元间距主要影响方向图的栅瓣。图6是距离为600 km,频率差为300 Hz的阵元间距相关波束图,阵元间距取值不同时,栅瓣的位置及周期也不同。图7表明, $d/\lambda = 0.9$ 是出现栅瓣的临界值。因此,阵元间距取值不应过大。

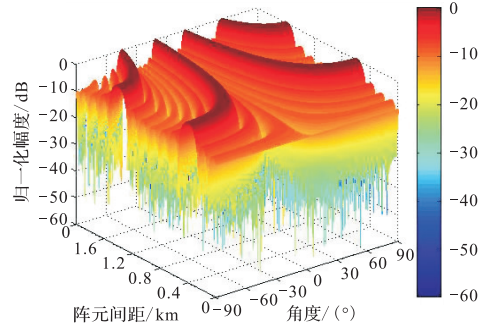


图6 阵元间距相关波束图

Fig.6 Beam pattern of array element spacing

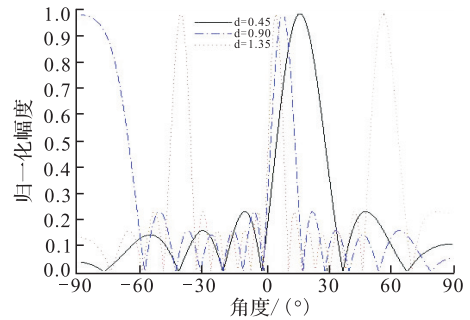


图7 阵元间距的角度欺骗效果

Fig.7 Angle deception effects of array element spacing

5 结语

本文提出了一种基于FDA的角度欺骗的方法。利用阵元激励电流间的线性频率差,将距离引入到阵元相位差中,使同相波前与距离相关,反映在空间中,不同距离处的波束指向不同,以此形成虚拟辐射源,取得对侦察接收机的角度欺骗效果。仿真表明,对于远区目标,该方法取得了良好的效果。

参考文献(References):

[1] 张福丹. 频率分集阵列雷达波束控制及应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
ZHANG Fudan. Frequency Diverse Array Radar Beam Control and Application Research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)

[2] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Multi-Mission Multi-Mode Waveform Diversity

- [C] //Proceedings of the IEEE Conference on Radar, New York, 2006:580-582.
- [3] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Range - Dependent Beamforming Using Element Level Waveform Diversity[C] //International Waveform Diversity and Design Conference.Hawaii, USA, 2006:71-76.
- [4] ANTONIK P. An Investigation of a Frequency Diverse Array [D]. London: University College London, 2009.
- [5] 张福丹. 基于频率分集阵列的聚束 SAR 虚拟辐射源 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):420-434.
ZHANG Fudan. Virtual Radiation Source of a Spotlight SAR Based on Frequency Diverse Array [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):420-434.(in Chinese)
- [6] ANTONIK P, GRIFFITHS H D, WEINER D, et al. Novel Diverse Waveforms, In-House Technical Report [R]. AFRL-SN-RS-TR-2001-52, 2006.
- [7] SAMMARTION P F, BACKER C J, HHGH D C. Frequency Diverse MIMO Techniques for Radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1):201-222.
- [8] 胡柏林, 廖桂生, 许京伟, 等. 前视阵频率分集雷达空时杂波特性研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11):2093-2099.
HU Bailin, LIAO Guisheng, XU Jingwei, et al. Study on Space-time Character of Clutter for Forward-looking Frequency Diverse Array Radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013, 35(11):2093-2099.(in Chinese)
- [9] HUANG Jingjing, TONG Kin-fai, BAKER C J. Frequency Diverse Array with Beam Scanning Feature [C]//Antennas and Propagation Society International Symposium, Beijing: 2008:1-4.
- [10] WANG Wenqin, SHAO Huaizong, CAI Jingye. Range-angle-dependent Beam Forming by Frequency Diverse Array Antenna[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2010, 17(2):25-31.
- [11] BAIZERT P, HALE T B, TEMPLE M A, et al. Forward-looking Radar GMTI Benefits Using a Linear Frequency Diverse Array [J]. Electronics Letters, 2006, 42(22):1311-1313.
- [12] 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 Yongshun, TONG Ningning, ZHAO Guoqing. Principles of Electronic Warfare [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.(in Chinese)
- [13] SAVAGE C O, MORAN B. Waveform Selection for Maneuvering Targets within an IMM Framework [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3):1205-1214.
- [14] 郑昱. 基于频率分集阵列的波束形成研究[J]. 现代雷达, 2015, 37(8):29-32.
ZHENG Yu. A Study on the Beam Forming of Frequency Diverse Array [J]. Modern Radar, 2015, 37(8):29-32.(in Chinese)

(编辑:姚树峰)