

基于频控阵的无源定位对抗技术

关浩亮^① 张顺生*^② 王文钦^①

^①(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

^②(电子科技大学电子科学技术研究院 成都 611731)

摘 要: 无源定位技术是现代电子战领域中重要的组成部分,然而现有的对抗无源定位系统采用的射频隐身、电子干扰等传统方法仍存在着很大的局限性。该文提出将频控阵技术应用到无源定位对抗领域,频控阵独特的波束扫描特性使得主波束在同一方位角度位置处的波束驻留时间缩短,无源定位系统无法长时间截获频控阵信号。另一方面,频控阵信号的时变特性使得无源定位系统接收信号信噪比大大降低,因此能有效地增加无源定位系统的定位误差,降低其定位效能。搭载有频控阵辐射源的系统在利用自身辐射信号对外部环境进行感知的同时,又能阻止敌方的无源定位系统对其实施定位侦察。理论分析和仿真验证均证实了频控阵辐射源针对干涉仪测向与时频差定位两种无源定位方法具备优良的对抗性能,该文的仿真实例显示采用频控阵辐射源时其探测精度明显降低,从而为研究同时具备主动探测和无源定位对抗能力的新一代电子系统提供了新的技术思路。

关键词: 电子战; 无源定位对抗; 频控阵; 干涉仪测向; 到达频差; 到达时差

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)06-0833-09

DOI: 10.12000/JR21091

引用格式: 关浩亮, 张顺生, 王文钦. 基于频控阵的无源定位对抗技术[J]. 雷达学报, 2021, 10(6): 833–841. doi: 10.12000/JR21091.

Reference format: GUAN Haoliang, ZHANG Shunsheng, and WANG Wenqin. Passive localization countermeasure based on frequency diverse array[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(6): 833–841. doi: 10.12000/JR21091.

Passive Localization Countermeasure Based on Frequency Diverse Array

GUAN Haoliang^① ZHANG Shunsheng*^② WANG Wenqin^①

^①(School of Information and Communication Engineering, University of Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

^②(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Passive localization technology is an integral part of electronic warfare. However, most methods for countering passive localization systems, such as radio frequency stealth and electronic interference, have limitations. This paper proposes a new passive localization countermeasure method based on Frequency Diverse Array (FDA). The unique beam scanning property reduces dwell time at a certain azimuth direction, making it difficult for a passive localization system to intercept FDA signals for a long time. In contrast, the time-varying characteristics of the FDA considerably reduce the signal-to-noise ratio of the received signal, increasing the difficulty in accurately detecting the localization information of the radiation source. Thus, using this new technology, the electronic system platform can perceive the external environment through the signals radiated by the FDA antenna while deceiving the enemy's passive localization system. Both theoretical analysis and numerical results showed that FDA transmitted signal achieved significantly better localization countermeasure performance in direction finding by an interferometer, frequency difference of arrival, and time difference of

收稿日期: 2021-07-01; 改回日期: 2021-08-21; 网络出版: 2021-09-08

*通信作者: 张顺生 zhangss@uestc.edu.cn *Corresponding Author: ZHANG Shunsheng, zhangss@uestc.edu.cn

基金项目: 国家部委基金

Foundation Item: The National Ministries Foundation

责任主编: 朱圣棋 Corresponding Editor: ZHU Shengqi

arrival, which are particularly useful for a new generation of electronic systems with reconnaissance detection and passive localization countermeasures capability.

Key words: Electronic warfare; Passive localization countermeasure; Frequency Diverse Array (FDA); Direction finding by interferometer; Frequency Different of Arrival (FDOA); Time Different of Arrival (TDOA)

1 引言

无源侦察定位在现代化电子战争中占据着十分重要的地位。无源侦察定位通过截获目标辐射源信号进行分析侦察, 其在整个定位过程中保持无线电静默, 因此定位过程更加安全和保密^[1,2]。

传统的无源定位技术包含到达时间(Time of Arrival, TOA)定位, 来波方向(Direction of Arrival, DOA)估计, 到达时差(Time Different of Arrival, TDOA)定位, 到达频差(Frequency Different of Arrival, FDOA)定位和时频差联合定位等^[3,4]。其中干涉仪测向方法和时频差联合定位方法是应用十分广泛的无源定位方法。干涉仪测向仅需要一个平台即能得到目标的方位信息, 且结构简单, 观测频带宽, 因此在电子对抗、雷达、导航等领域具有重要的应用^[3]。时频差联合定位通过估计两平台接收信号之间的时差和频差, 进而精确地估计舰船、飞机、车辆等辐射源的位置和速度信息。尤其是在低信噪比条件下具有极大的优势, 因此是星载双站定位最常用的定位方法^[5-7]。

与无源定位技术相比, 其对抗技术发展较为缓慢, 目前针对无源定位的对抗手段多采用对抗有源雷达的方式, 包括电子干扰^[8,9]、射频隐身等方法^[10-13]。电子干扰技术通过借助干扰天线发射欺骗干扰或压制干扰信号。当无源定位系统捕获到干扰信号后, 无法准确地解析侦察参数, 从而估计出错误的目标位置信息, 达到定位对抗的目的。然而, 采用这一手段首先需要侦察无源定位系统的方位信息^[8], 另一方面, 压制干扰信号和欺骗信号也容易被抑制或滤除^[14,15]。射频隐身是指包括减少雷达、通信等辐射源天线辐射信号的射频信号特性, 通过辐射窄波束和低旁瓣的低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)信号使得无源定位系统难以截获辐射源信号或无法通过截获的信号准确估计出目标辐射源的位置。窄波束限制了空域搜索扫描中的驻留时间, 可能需要多个同步波束来充分覆盖探测区域, 而低旁瓣提高了对制造精度的制造要求^[11,13]。因此采用射频隐身的对抗方法存在着电子系统既要利用辐射信号进行战场态势感知, 又要避免被敌方侦察探测的矛盾。

频控阵概念上是在相控阵天线上增加了一个远

小于天线工作载频的发射频率增量, 从而实现具有角度-距离-时间依赖性的发射方向图^[16], 其阵列波束能够在同一个快拍内以相同的角度指向不同的距离, 因此频控阵除了具备相控阵的所有功能特性外, 在距离主瓣干扰抑制、目标主动探测、电子对抗等方面具有十分重要的应用前景^[14,17-19]。在目标主动探测方面, SAMMARTINO等人^[20]提出一种基于频控阵的双站雷达系统, 并引入非线性频和MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)配置, 增加了雷达系统的自由度, 并分析了频控阵雷达目标探测过程中由距离-方位角耦合性带来的目标参数估计模糊的问题。和相控阵雷达、传统MIMO雷达相比, 频控阵可以利用频控阵频偏的优势, 实现对目标的距离-角度联合估计^[21,22], 并在提高检测性能上具有很大的优势^[23,24]。文献^[25]设计了通用的频控阵雷达相干接收机设计方法, 并通过与相控阵雷达的相应性能指标比较, 表明了频控阵具备更优越的角度和距离分辨能力。文献^[26]从频控阵发射阵列波束方向图出发, 指出了频控阵角度距离估计与传统MIMO雷达阵列相比有更优的估计性能。然而以上研究多从频控阵自身出发。针对频控阵信号的抗截获性能和在无源定位对抗中的表现却鲜有提及。频控阵独有的时间, 距离, 角度依赖特性在为自身对目标的主动探测提供了极大优势的同时, 也为频控阵应用到无源定位对抗领域带来了机遇。

本文较为详尽地分析了频控阵信号在对抗不同体制无源定位系统的效果, 并以干涉仪测向方法和时频差定位方法为例, 考虑在频控阵主动探测场景下, 敌方无源定位系统接收频控阵信号的定位效果。通过和传统相控阵主动探测场景的对比, 从理论分析和仿真验证两方面验证了无源定位系统无法准确获知频控阵辐射源位置的设想, 即频控阵具备优良的对抗无源定位系统的能力。搭载频控阵天线电子系统平台在通过频控阵辐射的信号对外部环境进行感知的同时, 又能对敌方的无源定位系统进行位置欺骗, 这将大大提高平台的突防能力和生存性能, 从而为研究同时具备侦察探测和无源定位对抗能力的新一代电子系统提供了新的技术思路。

本文共分为6部分, 第2节给出了频控阵接收信号模型, 并分析了信号的时变性对定位对抗性能的

影响。第3节研究了频控阵信号对抗干涉仪测向定位方法的性能。第4节研究了频控阵信号对抗双站时频差定位方法的性能。第5节给出了仿真分析。第6节总结全文。

2 频控阵接收信号模型分析

2.1 频控阵发射信号模型

考虑 M 阵元常规频控阵, 在每个阵元增加一个远小于载频信号 f_0 的频率增量 Δf_m , 则第 m 个阵元的辐射信号频率为

$$f_m = f_0 + \Delta f_m, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (1)$$

第 m 个频控阵阵元的辐射信号可表示为

$$s_m(t) = \phi(t) \exp(-j2\pi f_m t) \quad (2)$$

其中, $\phi(t)$ 为传输基带复信号。考虑 $\mathbf{w}_T = [w_{T,0}, w_{T,1}, \dots, w_{T,M-1}]^T$ 为发射权向量, 其中“ $[\cdot]^T$ ”为矩阵转置运算, 则以第1个阵元作为参考, 其在远场的侦察位置 (θ, r) 处合成信号为

$$s(\theta, r, t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_{T,m}^* \phi(t - \tau_m) \exp(j2\pi f_m(t - \tau_m)) \quad (3)$$

其中, θ 为频控阵法线方向到信号接收点的角度, r 为第1个阵元到信号接收点的距离。“ $*$ ”为复共轭运算。考虑窄带信号, 则有 $\phi(t - \tau_m) \approx \phi(t - \tau)$, 其中 $\tau = r/c$, c 为光速, 此时式(3)可化简为

$$s(\theta, r, t) \approx \phi(t - \tau) \sum_{m=0}^{M-1} w_{T,m}^* \exp(j2\pi f_m(t - \tau_m)) \quad (4)$$

若不考虑发射权重和传输基带复信号的影响, 则观测点处的接收信号可表示为

$$s(\theta, r, t) \approx \sum_{m=0}^{M-1} \exp(j2\pi f_m(t - \tau_m)) \quad (5)$$

当 $\Delta f_m = \Delta f$ 时, 则为常规频控阵信号。

2.2 频控阵信号的半功率波束宽度

无源定位系统对辐射信号的截获概率与信号的半功率波束宽度相关, 较窄的信号波束能使辐射信号截获球半径减小, 降低信号被截获概率, 从而表现出更优越的抗截获能力^[27]。

半功率波束宽度的定义为

$$|s(\theta_r, r, t)| = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

针对常规频控阵, 式(6)可进一步化简为

$$\left| \frac{\sin(M\pi\varphi)}{\sin(\pi\varphi)} \right| = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

根据泰勒公式,

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + O(x^7) \quad (8)$$

这里 $\sin(M\varphi) \rightarrow 0$, 展开式(7)前两项(忽略更高阶项)并进行化简,

$$\left| \frac{M\varphi - \frac{(M\varphi)^3}{3!} + \frac{(M\varphi)^5}{5!} - \frac{(M\varphi)^7}{7!} + O[(M\varphi)^7]}{\varphi - \frac{(\varphi)^3}{3!} + \frac{(\varphi)^5}{5!} - \frac{(\varphi)^7}{7!} + O[(\varphi)^7]} \right| = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

其中, $O[\cdot]$ 为泰勒展开余项。得到常规频控阵的半功率波束宽度 τ_{ULA} 为

$$\tau_{\text{ULA}} = \frac{2}{\pi\Delta f} \sqrt{\frac{6(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}M^2-1}} \quad (10)$$

同理, 对称频偏频控阵其半功率波束宽度 τ_{cs} 可表示为

$$\tau_{\text{cs}} = \frac{4}{\pi\Delta f} \sqrt{\frac{6(\sqrt{2}-1)}{\sqrt{2}M^2-1}} \quad (11)$$

对数频偏频控阵无法得到其半功率波束宽度 τ_{log} , 可表示为

$$\sum_{m=0}^{M-1} |\exp(-j2\pi\Delta f_{\text{log}}t)| = \sum_{m=0}^{M-1} (m+1)^{-j2\pi\Delta f\tau_{\text{log}}} = \frac{M}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

和相控阵不同, 频控阵信号的半功率波束宽度与频偏大小和频偏类型有关, 图1展示了 $\Delta f = 10$ kHz, $M = 8$ 时不同类型频偏频控阵半功率波束宽度对比。

3 基于频控阵信号的干涉仪测向对抗方法

考虑常规频控阵发射天线, 假设第 m 个阵元的因子是 $F_e(\omega_m)$, 其中 $F_e(\omega_m)$ 是角频率的函数, 则在远场观测点 (θ, r) 位置的方向图为

$$F(\theta, r, t) = \sum_{m=1}^M F_e(\omega_m) \exp\left[j\left(\omega_m t - \frac{\omega_m r_m}{c}\right)\right] \quad (13)$$

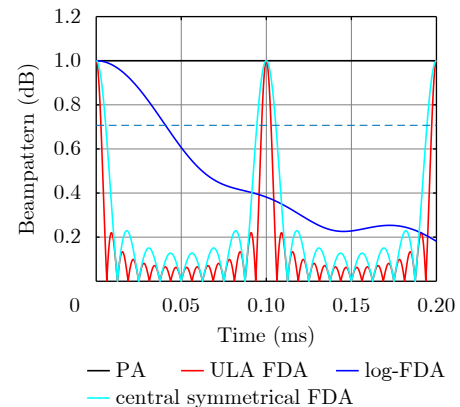


图1 不同类型频控阵信号的半功率波束宽度

Fig. 1 Half-power beamwidth of different FDA signal

其中

$$\begin{aligned}\omega_m &= 2\pi(f_0 + (m-1)\Delta f) = \omega_0 + 2\pi(m-1)\Delta f \\ &= \omega_0 + \Delta\omega, \\ r_m &= r - (m-1)d\sin\theta\end{aligned}$$

式中, t 为观测时间, d 为频控阵阵元间距, θ 为阵列法向与观测点的夹角, r 为观测距离。考虑在远场情况下, 满足 $(M-1)d \ll r$, 且频率增量很小。因此各阵元辐射方向图相似, 即阵列因子 $F_e(\omega_m) \approx F_e(\omega_0)$ 均可近似表示为 $F_e(\omega_0)$ 。式(13)可以简化为

$$F(\theta, r, t) = F_e(\omega_0) \exp\{j(\omega_0 t - qr)\} \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)\zeta} \quad (14)$$

其中, $\zeta = (2\pi f_0 d \sin\theta - 2\pi \Delta f r)/c + 2\pi \Delta f t$ 。考虑干涉仪接收阵元间距为 $D = \lambda_0/2$, 其中 $\lambda_0 = c/f_0$, 则在不考虑空间噪声的前提下, 接收信号可进一步表示为

$$\begin{aligned}s_{rm}(t) &= \exp\left[j\left(\omega_c t - \omega_c \frac{R_n}{c}\right)\right] \\ &\times \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)\zeta_n}, \quad n = 1, 2 \\ \zeta_n &= (-2\omega_c D \sin\theta - 2\pi \Delta f R_n)/c + 2\pi \Delta f t\end{aligned} \quad (15)$$

由 $R_2 = R_1 - D \sin\theta$, 则到达干涉仪两个阵元的相位为

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{21}(t) &= \angle s\left(t' + \frac{D \sin\theta}{c}\right) - \angle s(t') + 2\pi \frac{D \sin\theta}{\lambda} \\ &\approx 2\pi \frac{D \sin\theta}{\lambda}, \\ \lambda &= \frac{Mc}{\sum_{m=0}^M (f_m)}\end{aligned} \quad (16)$$

其中, $t' = t - R_1/c$, λ 为频控阵阵元发射信号中心频率对应的信号波长, 考虑到 $D \sin\theta/c \rightarrow 0$, 忽略信号本身的相位差, 式(16)进一步简化为

$$\Delta\varphi_{21}(t) \approx 2\pi \left(f_0 + \frac{(M-1)\Delta f}{2}\right) \frac{D \sin\theta}{c} \quad (17)$$

由此得到基于干涉仪测向方法的无源定位系统测量常规频控阵来波方向为

$$\theta = \arcsin \frac{c\Delta\varphi_{21}(t)}{2\pi d [f_0 + (M-1)\Delta f/2]} \quad (18)$$

测向结果与频偏大小 Δf 和阵元个数有关, 在大频偏情景下, 干涉仪测向技术不能精准估计辐射源的来波方向。

为探究频控阵时变性对测向定位对抗性能的影响。现推导高斯白噪声下无源定位系统对频控阵辐射源测向估计性能的克拉默-拉奥界限。假设在远

场条件下, 入射角度为 θ , 考虑到频控阵信号的时变性, 在远场方位和距离分别为 θ, R 时信号幅值表示为 $|A(\theta, R, t)|$ 。由此得到测量来波信号角度的CRB界限为^[28]

$$\sigma_\theta^2 \geq \frac{3\lambda^2 \sigma_w^2}{8\pi^2 N (N^2 - 1) P(\theta, R, t) D^2 \cos^2\theta} \quad (19)$$

其中, $P(\theta, R, t) = A(\theta, R, t)^2$ 为信号的瞬时功率, σ_w^2 为噪声功率谱密度, N 为阵元个数, 令 $N = 2$, 则有

$$\sigma_\theta^2 \geq \frac{\lambda^2 \sigma_w^2}{16\pi^2 P(\theta, R, t) D^2 \cos^2\theta} \quad (20)$$

考虑频控阵信号独特的距离角度依赖特性和时变特性, 因此无源定位系统接收到频控阵信号的瞬时功率随时间变化, 其到达角度误差也随时间变化, 且与频控阵辐射源的频偏种类和大小相关。

针对采用测向方法的双站或多站无源定位系统, 其主要技术手段是通过干涉仪测角方法得到多个圆锥面, 并通过多个圆锥面相交确定目标位置。当各站角度估计精度降低时, 会造成多个圆锥面相交点误差增大或无相交点, 从而使得定位误差增大。因此频控阵辐射源也具备对抗双站或多站无源定位系统的能力。

4 基于频控阵信号的时频差定位对抗方法

考虑采用双站时频差定位系统模型, 若主站和副站到频控阵天线第一阵元的距离分别为 r_1, r_2 , 角度分别为 θ_1, θ_2 , 则两接收机接收信号可分别表示为

$$s_i(\theta_i, r_i, t) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{1}{r_i} \exp\left\{-j2\pi f_m \left(t - \frac{r_i}{c}\right)\right\}, \quad i = 1, 2 \quad (21)$$

其中, f_m 为第 m 个阵元的辐射频率。 t 为观测时刻。基于互模糊函数的时频差联合估计算法能同时估计信号的到达时频差, 尤其是在低信噪比的空间定位中具备极大的优势。频控阵信号的互模糊函数可表示为

$$A(\hat{\tau}, \hat{f}) = \int_0^\tau y_1(t) y_2^*(t + \hat{\tau}) \exp(-j2\pi \hat{f} t) dt \quad (22)$$

其中, $y_1(t), y_2(t)$ 分别为两接收机的接收信号。 $\hat{\tau}, \hat{f}$ 分别为待估计频控阵信号的到达时差和信号到达频差, “*” 为复共轭运算。根据互模糊函数图上最大峰值位置即可得到频控阵到达时差和到达频差的估计值。图2考虑了相控阵辐射源与常规频控阵互模糊函数。频控阵信号的半功率波束宽度较窄, 因此在相同信噪比和积累时间条件下, 其峰值幅度更低, 对噪声更加敏感。从另一方面考虑, 频控阵信号的

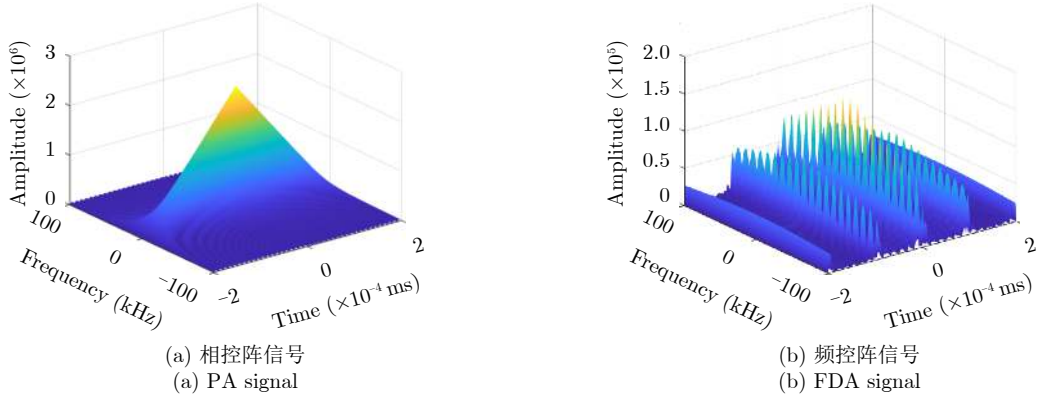


图2 不同类型辐射源条件下的信号互模糊函数图

Fig. 2 Cross ambiguity function from different signal sources

模糊函数图具有多互模糊峰值特性, 直接使用互模糊函数不易可靠地搜索到最大峰值的位置, 因此存在时差模糊和频差模糊的现象。这也给基于时频差定位方法的无源定位系统的精确定位带来了挑战。

为定量的分析频控阵频偏类型和大小对时频差估计精度和无源定位性能的影响, 现从信号检测与估计理论出发, 推导基于频控阵信号时频差估计性能的克拉默-拉奥界限。考虑测量Fisher信息矩阵为 $\mathbf{I}(\phi)$, 其矩阵元素表示为: $I_{i,j}(\phi), i=1,2; j=1,2$, 由此得到信号估计到达时差和到达频差误差的克拉默-拉奥界限为^[28]

$$\begin{aligned}\sigma_{\tau}^2 &= I_{11}^{-1}(\phi) = \frac{I_{22}}{|\mathbf{I}(\phi)|} \\ \sigma_{\nu}^2 &= I_{22}^{-1}(\phi) = \frac{I_{11}}{|\mathbf{I}(\phi)|}\end{aligned}\quad (23)$$

其中, $\mathbf{I}(\phi)$ 与频控阵天线的频偏 Δf_m 有关, 当 $\Delta f_m = 0$ 时, 可得到辐射源为相控阵时的到达时差和到达频差误差的克拉默-拉奥界限。

5 仿真分析

为进一步探究频控阵信号在对抗无源定位系统中的作用效果, 探究不同阵列参数的影响。本节设置了频控阵辐射源和相控阵辐射源对比定位场景, 并通过仿真分析的方法对比无源定位系统对采用传统相控阵辐射源和频控阵辐射源定位性能的差异。

5.1 频控阵对抗干涉仪测向定位方法的性能分析

构建如图3侦察场景, 假设频控阵辐射源位于场景坐标系原点 O , 携带有测向侦察定位功能的侦察接收机位于空中 P 点, 干涉仪基线指向垂直方向与目标视线方向的夹角为 θ 。

现考虑接收信号信噪比 $\text{SNR}=10$ dB, 当侦察接收机位于 $\theta = 40^\circ$ 时, 采用对比实验的方法分别统计场景坐标系原点放置基于频控阵和相控阵两种相同参数辐射源时侦察平台得到的测向误差。图4分

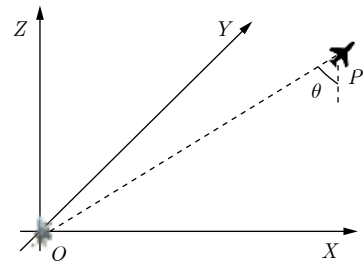


图3 侦察仿真场景示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reconnaissance scene

别展示了基于干涉仪测量方法的频控阵与相控阵在不同接收时刻的测向定位性能。无源定位系统接收频控阵信号测向误差增大, 当接收时刻在信号半功率波束宽度内时, 信号的瞬时功率 $P(\theta, R, t)$ 较大, 其测向性能较好。当接收到频控阵旁瓣信号时, 测相误差增大, 因此无法通过统计方法准确估计辐射源来波方向。考虑到频控阵天线在通信领域的应用场景, 图4(c)和图4(d)分别展示了辐射正交相移键控数字调制信号(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)和脉冲波形体制信号的测向性能表现, 以验证其在雷达与通信不同领域中对抗测向定位的能力。针对不同的信号类型, 频控阵仍能表现出鲁棒的对抗性能, 因此该方案具备一定的普适性。图5为无源定位系统对频控阵辐射源测量误差的克拉默-拉奥界限(Cramér-Rao Bound, CRB)与均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分析, 其RMSE和CRB与频控阵信号的时变性相关, 因此频控阵信号具备对抗干涉仪测向定位的能力。

5.2 频控阵对抗时频差定位方法的性能分析

考虑地固坐标系下的双站时频差侦察定位场景, 其中两个无源定位系统观测站的位置分别在 $(-3246.602, 4863.877, 3620.918)$ 和 $(-3156.772, 4951.585, 3619.156)$ (单位: km), 目标辐射源位于地球表面, 其位置为东经 $124^\circ 19' 1''$, 北纬 $28^\circ 48' 31''$ 。

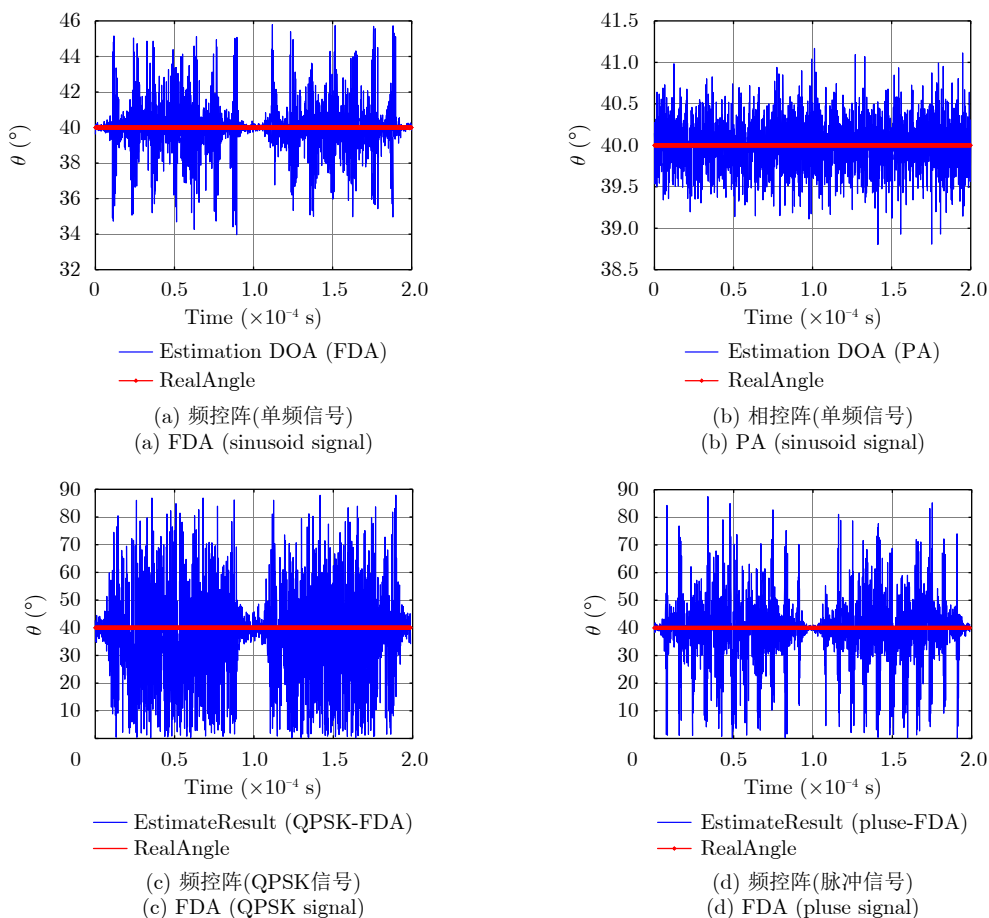


图4 不同辐射源与信号类型条件下的测向精度

Fig. 4 Accuracy of DOA from different signal sources or signal type

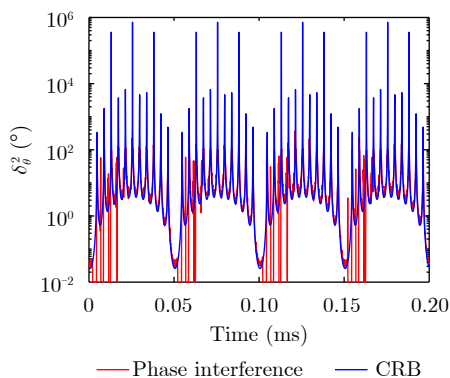


图5 频控阵信号测向误差克拉默-拉奥界限与均方根误差比较

Fig. 5 CRB and RMSE analysis of DOA from FDA signal

图6和图7分别展示了采用不同频偏大小和不同频偏类型频控阵辐射源时,其测量时差和测量频差误差的CRB情况,其中阵元个数 $M = 8$,信号载频 $f_0 = 1 \text{ GHz}$,频偏大小 $\Delta f = 600 \text{ Hz}$ 。阵元大小和频偏类型均会影响时频差估计精度,进而间接的影响无源定位系统的探测精度。尤其是在卫星定位等低信噪比环境下,频控阵能表现出更优越的定位对抗性能。为得到更优的频偏组合,以达到更优的定

位对抗性能。本文采用遗传算法对频偏进行优化,其计算复杂度应为 $O\{GNM\}$,其中 G 为总的遗传代数, N 为每一代的个体数。相比穷搜法呈指数增长的复杂度,遗传算法的复杂度与阵元数呈线性关系,因此能极大地降低复杂度,有利于工程实现。考虑阵元频偏最大值 $\Delta f_{\max} = (M - 1)\Delta f$,最大遗传代数为200,每代个数为500个。通过遗传算法,当8个阵元频率分别为 $\Delta f_m = \mathbf{W}\Delta f_{\max}, m = 0, 1, \dots, 7, \mathbf{W} = [0.462, 0.986, 0.999, 0.778, 0.475, 0.218, 0.765, 0.205]$ 时,此时得到最优的定位对抗效果,该方法为探究频控阵较优频偏组合的工程应用提供了技术思路。图8展示了阵元个数对定位对抗效果的影响,不同的阵元个数不影响相控阵辐射源的定位精度,但随着阵元个数的增加,侦察系统对频控阵辐射源的频差估计性能变差,尤其是在较低的信噪比下,频控阵具备更优越的无源定位对抗性能。

现对采用常规频偏 $\Delta f = 600 \text{ Hz}$ 的频控阵和相同条件下的相控阵作为辐射源,对采用互模糊函数方法的时频差定位系统来波信号测量时差误差和测量频差误差情况绘制几何精度因子(GDOP)曲线,如图9所示,其频控阵的定位精度远低于相控阵定

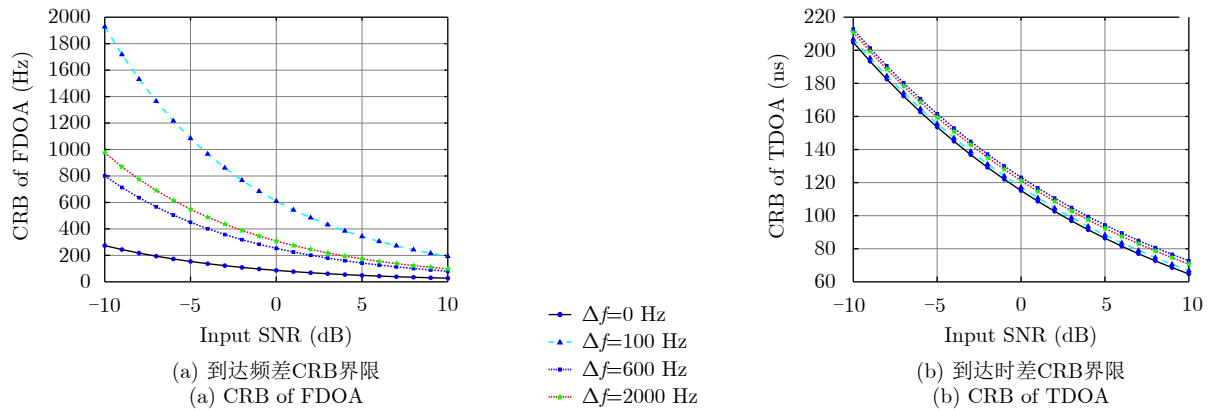


图6 不同频偏大小条件下的时频差克拉默-拉奥界比较

Fig. 6 CRBs analysis under different Δf of FDA and PA

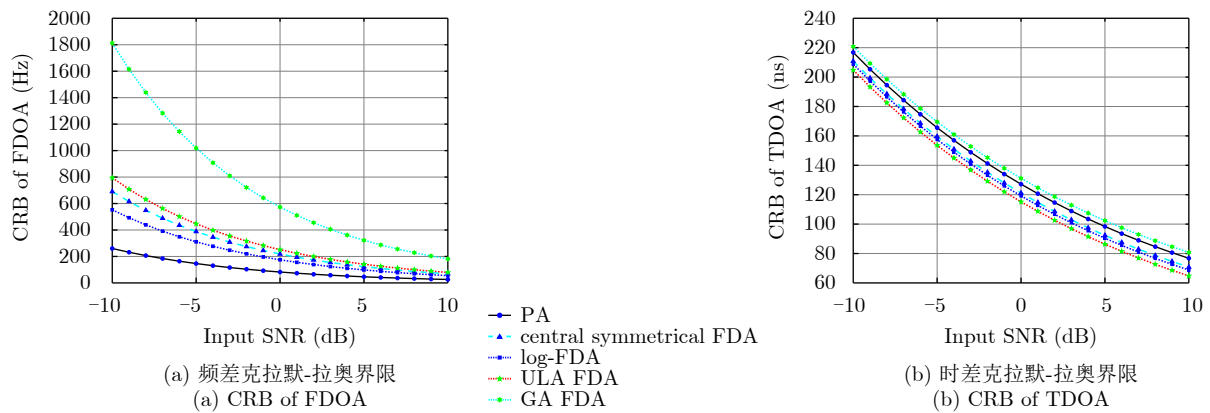


图7 不同频偏类型条件下的时频差克拉默-拉奥界比较

Fig. 7 CRBs analysis under different non-standard FDA and PA

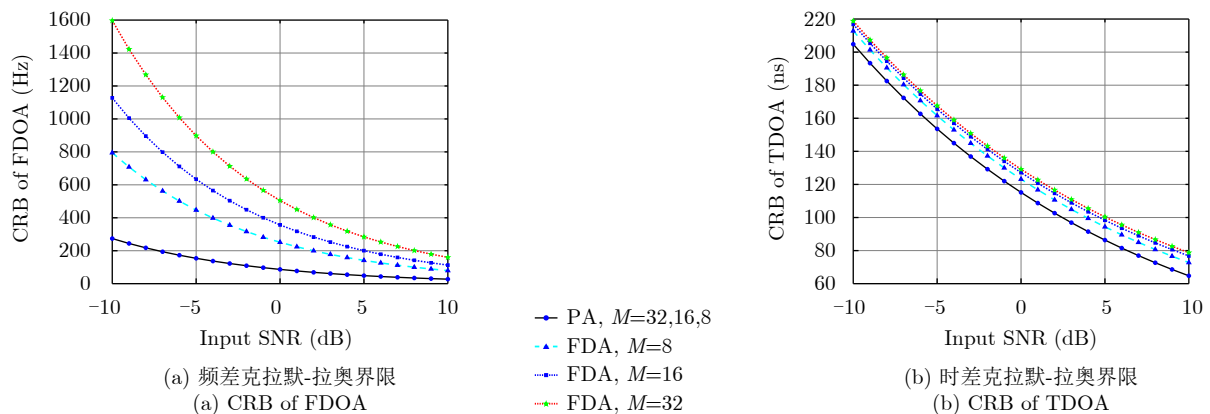


图8 不同阵元个数条件下的时频差克拉默-拉奥界比较

Fig. 8 CRBs analysis under different element of FDA and PA

位精度。因此频控阵辐射源具备优良的对抗时频差无源定位的能力。

6 总结

本文分析和验证了频控阵在无源定位对抗应用中的有效性。并以测向定位和时频差联合定位两种

常见的无源定位手段为例，验证了频控阵在定位对抗中的具体表现。分析了频控阵时变性和频偏因素对性能的影响，得出了频控阵能有效的增加无源定位系统的定位误差，降低其定位效能的结论。进而为研究同时具备主动探测和无源定位对抗能力的新一代电子系统提供了新的技术思路。

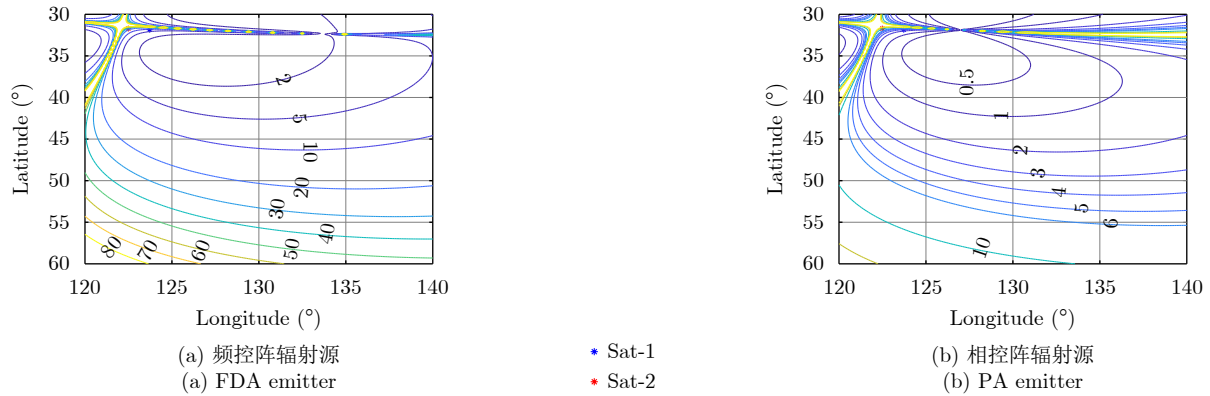


图 9 不同辐射源条件下的定位误差分布图

Fig. 9 Localization error distribution under different radiation sources

参 考 文 献

- [1] YOUSSEF M, MAH M, and AGRAWALA A. Challenges: Device-free passive localization for wireless environments[C]. Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, Québec, Canada, 2007: 222–229.
- [2] FRIEDLANDER B. A passive localization algorithm and its accuracy analysis[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1987, 12(1): 234–245. doi: [10.1109/JOE.1987.1145216](https://doi.org/10.1109/JOE.1987.1145216).
- [3] ZEKAVAT S A and BUEHRER M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances[M]. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011: 28–40.
- [4] GEZICI S, TIAN Zhi, GIANNAKIS G B, *et al.* Localization via ultra-wideband radios: A look at positioning aspects for future sensor networks[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 70–84. doi: [10.1109/MSP.2005.1458289](https://doi.org/10.1109/MSP.2005.1458289).
- [5] 杨林森. 目标辐射源无源定位中的时/频差估计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
YANG Linsen. TDOA/FDOA estimation in passive emitter localization[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [6] 高向颖, 赵拥军, 刘智鑫, 等. 存在站址误差下的时频差稳健定位算法[J]. *雷达学报*, 2020, 9(5): 916–924. doi: [10.12000/JR20039](https://doi.org/10.12000/JR20039).
GAO Xiangying, ZHAO Yongjun, LIU Zhixin, *et al.* Robust source localization using TDOA and FDOA with receiver location errors[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(5): 916–924. doi: [10.12000/JR20039](https://doi.org/10.12000/JR20039).
- [7] ZOU Yanbin and LIU Huaping. TDOA localization with unknown signal propagation speed and sensor position errors[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(5): 1024–1027. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2968434](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2968434).
- [8] GIARETTA A, BALASUBRAMANIAM S, and CONTI M. Security vulnerabilities and countermeasures for target localization in bio-NanoThings communication networks[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 11(4): 665–676. doi: [10.1109/TIFS.2015.2505632](https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2505632).
- [9] 王诗蕾. 基于预处理的无源定位对抗技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2016.
WANG Shilei. Research on preprocessing-based locating countermeasures technology for passive locating system[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [10] SHI Xiaoran, ZHOU Feng, ZHAO Bo, *et al.* Deception jamming method based on micro-Doppler effect for vehicle target[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1071–1079. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0371](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0371).
- [11] WANG Fei, SELLATHURAI M, LIU Weigang, *et al.* Security information factor based airborne radar RF stealth[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(2): 258–266. doi: [10.1109/JSEE.2015.00031](https://doi.org/10.1109/JSEE.2015.00031).
- [12] WANG Wenqin. Moving-target tracking by cognitive RF stealth radar using frequency diverse array antenna[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 3764–3773. doi: [10.1109/TGRS.2016.2527057](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2527057).
- [13] LYNCH JR D. Introduction to RF Stealth[M]. Raleigh: SciTech, 2004: 8–12.
- [14] 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).
- [15] 周超, 刘泉华, 胡程. 间歇采样转发式干扰的时频域辨识与抑制[J]. *雷达学报*, 2019, 8(1): 100–106. doi: [10.12000/JR18080](https://doi.org/10.12000/JR18080).
ZHOU Chao, LIU Quanhua, and HU Cheng. Time-frequency analysis techniques for recognition and suppression of interrupted sampling repeater jamming[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 100–106. doi: [10.12000/JR18080](https://doi.org/10.12000/JR18080).
- [16] 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. 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).
- [17] 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: [10.11999/JEIT151235](https://doi.org/10.11999/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: [10.11999/JEIT151235](https://doi.org/10.11999/JEIT151235).
- [18] XIANG Zhe, CHEN Baixiao, and YANG Minglei. Statistical method with dual-polarized MIMO array for target discrimination[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 1313–1316. doi: [10.1109/LAWP.2016.2633433](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2633433).
- [19] 尹光辉. 基于频率分集阵列的保密通信技术研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2020.
- YIN Guanghui. Research on secure communication technology based on frequency diversity array[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2020.
- [20] SAMMARTINO P F, BAKER C J, and GRIFFITHS H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 201–222. doi: [10.1109/TAES.2013.6404099](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404099).
- [21] WANG Yongbing, WANG Wenqin, and SHAO Huaizong. Frequency diverse array radar Cramér-Rao lower bounds for estimating direction, range, and velocity[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 2014: 830869. doi: [10.1155/2014/830869](https://doi.org/10.1155/2014/830869).
- [22] 巩朋成, 刘刚, 黄禾, 等. 频控阵MIMO雷达中基于稀疏迭代的多维信息联合估计方法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 194–201. doi: [10.12000/JR16121](https://doi.org/10.12000/JR16121).
- GONG Pengcheng, LIU Gang, HUANG He, *et al.* Multidimensional parameter estimation method based on sparse iteration in FDA-MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 194–201. doi: [10.12000/JR16121](https://doi.org/10.12000/JR16121).
- [23] WANG Wenqin and SHAO Huaizong. Range-angle localization of targets by a double-pulse frequency diverse array radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(1): 106–114. doi: [10.1109/JSTSP.2013.2285528](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2285528).
- [24] WANG Wenqin and SO H C. Transmit subaperturing for range and angle estimation in frequency diverse array radar[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(8): 2000–2011. doi: [10.1109/TSP.2014.2305638](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2305638).
- [25] 桂荣华. 频控阵雷达自适应处理关键技术研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2020.
- GUI Ronghua. Research on adaptive processing technology for frequency diverse array radar[D]. [Ph.D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [26] GAO Kuandong, WANG Wenqin, and CAI Jingye. Frequency diverse array and MIMO hybrid radar transmitter design via Cramér-Rao lower bound minimisation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(9): 1660–1670.
- [27] 何杰. 飞机射频隐身性能评估指标研究与软件实现[D]. [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2016.
- HE Jie. Research on aircraft RF stealth performance evaluation indexes and simulation system implementation[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [28] WANG Liu, WANG Wenqin, GUAN Haoliang, *et al.* LPI property of FDA transmitted signal[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, in press. doi: [10.1109/TAES.2021.3083402](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3083402).

作者简介



关浩亮, 男, 河北石家庄人。现为电子科技大学在读博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理。



王文钦, 男, 四川成都人。教授, 博士生导师, 主要研究方向为阵列处理及其在雷达、通信和电子对抗中的应用研究。



张顺生, 男, 四川成都人。研究员, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理。