

# 有限测试距离对 GNSS 抗干扰 天线阵远场测试的影响

房晓丽<sup>1</sup>, 吴礼杰<sup>2</sup>, 张金菊<sup>1</sup>

(1. 湖南信息学院电子信息学院, 湖南长沙 410151;  
2. 国防科技大学电子科学学院导航与时空技术工程研究中心, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 文章分析了暗室测试中有限测试距离对 GNSS 抗干扰天线阵测量结果的影响. 在固定波束情况下, 远场测试条件遵循经典结论, 即在待测天线与探头天线距离大于  $2D^2/\lambda$  ( $D$  为待测天线有效孔径) 时, 有限测试距离对方向图主瓣影响很小, 但会掩盖方向图波瓣零点; 在自适应处理情况下, 由于自适应权会自动补偿干扰导向矢量误差, 所以有限距离误差并不会对零点的位置和深度造成影响, 对方向图除零点之外部分的增益造成一定偏差, 但是这些增益偏差不会对抗干扰天线阵的平均阵列增益覆盖率造成显著影响. 所以, 在满足经典远场条件的暗室内进行抗干扰测试, 接收机的干扰抑制能力和可用性能均不会受到影响.

**关键词:** 卫星导航; 天线阵; 抗干扰; 暗室远场测试; 有限距离误差

**中图分类号:** TN967.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)05-1030-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.025

## Influence of Limited Test Distance on Far-field Measurement for GNSS Anti-jamming Array

FANG Xiao-li<sup>1</sup>, WU Li-jie<sup>2</sup>, ZHANG Jin-ju<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Information, Hunan Institute of Information Technology, Changsha, Hunan 410151, China;  
2. Engineering Research Center for Position, Navigation and Time, College of Electronic Science,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** This paper analyzes the limited distance induced effects of measurement performance for GNSS anti-jamming arrays. In the case of fixed beam array, according to the conventional far field condition, when the distance between the antenna under test and the probe antenna is longer than  $2D^2/\lambda$  ( $D$  is the size of antenna aperture), the limited test distance has little effects of the main beam, however, the first null of the pattern is partially filled. In the case of adaptive array, the nulls are kept for the limited distance induced steering vectors of interferences will be compensated by adaptive weights. The gain except for the nulls has some changes, but the bias has no remarkable effects of average angular coverage for array gain. We claim that the capability of anti-jamming and the usability of the receiver will be kept, when the test distance meet the condition of minimized far field distance.

**Key words:** satellite navigation; antenna array; anti-jamming; farfield measurement; limited test distance error

## 1 引言

相比时域或者频域滤波器的抗干扰方式, 抗干扰天线阵引入了空域角度的干扰抑制, 不但能够对抗窄带干扰, 还能够对抗宽带干扰, 因为这一优势, 天线阵抗干扰近些年来成为 GNSS 抗干扰研究中的一个热点课题<sup>[1-3]</sup>.

在自适应天线阵抗干扰接收机的研发中, 性能测

试是一项重要课题. 测试的意义不仅可以对接收机进行性能评估, 也是研制过程中进行性能改进的依据<sup>[4]</sup>. 暗室测试既能较好模拟接收机工作环境, 又能对整机进行完整测试, 是一种较为常用的天线阵测试方法<sup>[5]</sup>.

根据测试距离的不同, 暗室测试又可以分为近场测试和远场测试. 采用近场测试的有美国 MITRE 公司给出的 F-18 机载自适应天线阵的柱面扫描近场测试方

案<sup>[6]</sup>;SATIMO 公司为法国国防部提供的抗干扰天线阵测试系统<sup>[7]</sup>.采用远场测试方案的有 NAVSYS 公司对他们的小型化 CRPA 的测试,以及雷声公司为美国海军研制的天线阵抗干扰系统的四阵元天线阵的测试<sup>[8]</sup>.总体来看,相比近场测试需要更为先进的设备,远场测试的技术手段更为简单和直观.

目前公认的暗室远场测量最小距离是  $2D^2/\lambda$ ,该测试距离下天线口径的最大相位误差为  $\pi/8$ ,满足该测试距离时,测试弱方向性天线时引入的主瓣增益绝对误差小于  $0.3\text{dB}$ <sup>[9-11]</sup>.但是对大型雷达口面天线或者天线阵而言,以上述最小距离作为远场测量距离时,测试天线方向图将出现波束展宽,副瓣升高以及零点填充等误差<sup>[12,13]</sup>.

GNSS 抗干扰天线阵空域抗干扰原理是使阵列方向图在干扰方向形成零陷来抑制干扰.以往的文献中并没有阐述暗室测试中的有限距离是否会对零点形成造成误差.本文分析了传统阵列综合以及自适应阵列两种天线阵工作模式下,有限距离引入的测试误差的区别,指出了有限测量距离对抗干扰天线阵所关心的干扰抑制能力和可用性造成的影响.

## 2 有限测试距离对固定波束天线阵测试的影响

### 2.1 天线阵的方向图测试模型

建立天线阵模型及其测试坐标系.如图 1 所示,假设一个  $N$  元平面阵的参考点位于  $XOY$  平面内的原点,其中阵元  $i$  坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ ,与参考点距离为  $d_i$ .测试探头置于天线阵辐射场中的任意一点  $P$ ,参考点到  $P$  点的矢径大小为  $OP = r$ ,根据实际情况, $r$  为有限长度.

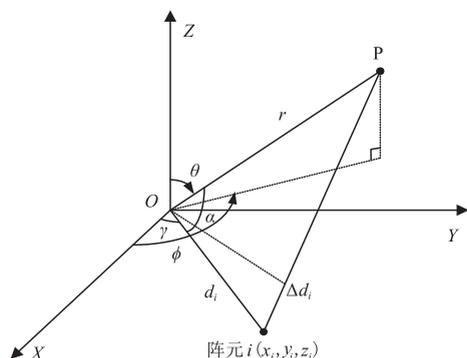


图1 有限距离信号入射天线阵及其坐标系

对于固定波束天线阵,可以得到天线阵的总响应为各阵元的信号响应向量加权和:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N w_i a_i x(t) e^{j2\pi\Delta d_i/\lambda_0} \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为阵列的输入及输出信号; $a_i$ 为阵元 $i$ 的响应; $w_i$ 为阵元 $i$ 的加权量; $\Delta d_i$ 为信号到参考

点及阵元 $i$ 之间的波程差; $\lambda_0$ 为信号中心频率波长.

### 2.2 有限测试距离对方向图的影响

阵列方向图定义为给定权矢量下不同角度信号阵列响应:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N w_i a_i e^{j2\pi\Delta d_i/\lambda_0} = \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta, \phi) \mathbf{v}(\theta, \phi) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{W}$ 为加权列向量, $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 为阵元响应构成的对角矩阵, $\mathbf{v}(\theta, \phi)$ 为导向矢量,为 $N$ 维列向量,与各阵元相对参考点的波程差相关:

$$\mathbf{v}(\theta, \phi) = [e^{j2\pi\Delta d_1/\lambda_0}, e^{j2\pi\Delta d_2/\lambda_0}, \dots, e^{j2\pi\Delta d_N/\lambda_0}]^T \quad (3)$$

假定阵元为理想点源( $a_i(\theta, \phi) = 1$ ),则对于均匀加权( $w_i = 1$ )的天线阵,只需要得到阵元相对参考点的信号波程差就可以计算导向矢量,从而进一步确定阵列方向图.

根据图 1 的天线阵方向图测试模型的几何关系,有限距离下信号为球面波,根据余弦定理,可以计算阵元 $i$ 与参考点的波程差为

$$\Delta d_i = \sqrt{r^2 + d_i^2 - 2rd_i \cos\alpha} - r \quad (4)$$

其中  $\cos\alpha$  可以按照式(4)计算:

$$\cos\alpha = \sin\theta \cos(|\phi - \gamma|) = \begin{cases} \sin\theta \cos\left(\left|\phi - \arccos\frac{x_i}{d_i}\right|\right), & y_i \geq 0 \\ \sin\theta \cos\left(\left|\phi - \arccos\frac{x_i}{d_i} - \pi\right|\right), & y_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

在实际应用环境中, $r \rightarrow \infty$ ,此时天线阵辐射场可视为平面波,则波程差可以表述为

$$\Delta d_i' = x_i \sin\theta \cos\phi + y_i \sin\theta \sin\phi \quad (6)$$

比较式(4)和式(6),由于波程差不同,天线阵方向图也有可能不同,即测试方向图 and 实际方向图不一致.接下来一节将采用数值仿真的方式得到测试误差的大小.

### 2.3 数值仿真

为了简化分析,采用三元直线阵进行仿真(三元直线阵符合一般的 GNSS 中心圆阵在一个维度上的模型),阵元为均匀辐射的理想点源,阵元间距为半波长,则阵列口径为一个波长,工作频率为北斗导航的 B3 频点.根据式(2),结合式(3)~(5),可以计算测量探头在有限距离和无限距离两种情况下的阵列方向图,结果如图 2 所示,其中,有限距离长度分别为最小远场条件及其 3 倍及 10 倍距离,在 B3 频点具体距离见表 1.

表 1 最小远场条件距离倍数及其具体长度

$t/m$	1	3	10
$t(2D^2/\lambda)$	0.47	1.42	4.73

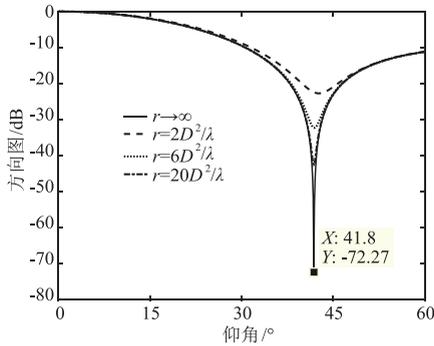


图2 理论方向图和各有限距离下方向图

从图2可以看到,对于固定波束阵列方向图,有限距离误差造成的主要影响是掩盖了应该出现的波瓣零点.本例中,零点出现在 $41.8^\circ$ 附近,最小远场条件下的零点深度约为 $-23\text{dB}$ ,3倍及10倍远场条件下的测量零点理论上分别可以达到 $-33\text{dB}$ 及 $-43\text{dB}$ .进一步增加测试距离,如增大到20倍远场条件,此时测试距离接近 $9.5\text{m}$ ,理论零点测量深度仍然不到 $-50\text{dB}$ .可见单纯增加测试距离对固定波束天线阵方向图的测量精度没有显著的提升.

另一方面,零点测量精度还与测试设备的机械精度密切相关,这是因为波瓣零陷较窄,测试时可能无法跟踪到零点的精确位置.图3给出了暗室测试转台的步进精度分别为 $5^\circ$ , $1^\circ$ , $0.1^\circ$ 及 $0.01^\circ$ 时的方向图,理论零点深度分别约为 $-27.1\text{dB}$ 、 $-47.0\text{dB}$ 、 $-72.3\text{dB}$ 和 $-102.3\text{dB}$ .

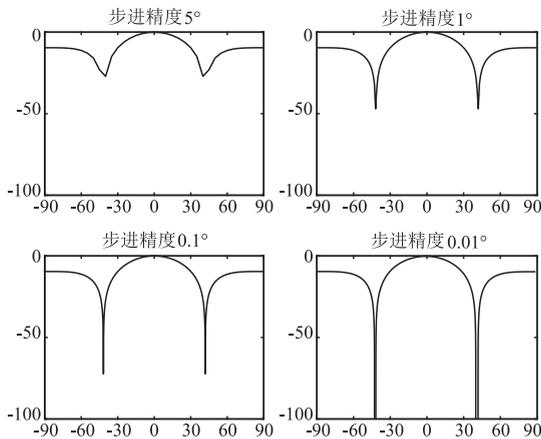


图3 不同步进精度下阵列方向图

## 2.4 小结

综上所述,对固定波束天线阵方向图进行测量时,如果只关注方向图主瓣增益、波束宽度等指标,测试距离只需要大于最小远场条件.如需更加精细的方向图测试结果,比如精确的波瓣零点深度,则需要大得多的测试距离.

实际上,除了大口面极低副瓣天线阵,真实应用中的固定波束天线阵主要关注主波束性能,不关注零点

深度.但对于GNSS抗干扰天线阵,方向图零点直接反映了干扰抑制程度,是一个重要指标.本文接下来一节分析有限距离误差对自适应天线阵方向图,尤其是零陷形成的影响.

## 3 有限测试距离对自适应天线阵的测试的影响

### 3.1 有限距离下的阵列信号模型

仍然采用图1所示的有限距离模型,假设有一个期望信号(为GNSS信号)和 $M$ 个干扰信号入射,则阵列接收信号矢量可表示为GNSS信号、干扰和噪声的叠加

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{s}(t) + \mathbf{j}(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{v}_0 s(t) + \sum_{m=1}^M \mathbf{v}_m j_m(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ ,为 $N$ 维阵列数据矢量; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ ,为 $N$ 维阵列噪声矢量; $\mathbf{v}_0$ 为期望信号导向矢量; $\mathbf{v}_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ )为第 $m$ 个干扰的导向矢量,统称为球面波导向矢量,导向矢量均为 $N$ 维列向量; $s(t)$ 为信号的复包络; $j_m(t)$ 为第 $m$ 个干扰的复包络.

定义 $\mathbf{\Gamma}_m$  ( $m = 0, 1, \dots, M$ )为有限距离误差因子矩阵

$$\mathbf{\Gamma}_m = \text{diag}[\rho_{m1}, \rho_{m2}, \dots, \rho_{mN}] \quad (8)$$

各对角因子忽略幅度误差,可以表示为

$$\rho_{mn} = e^{j2\pi(\Delta d'_{mn} - \Delta d_{mn})/\lambda_0}, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

平面波导向矢量和球面波导向矢量之间的关系可以用有限距离误差矩阵表示如下

$$\mathbf{v}'_m = \mathbf{\Gamma}_m \mathbf{v}_m, (m = 0, 2, \dots, M) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{v}'_m$  ( $m = 0, 2, \dots, J$ )为平面波导向矢量.

假设期望信号、干扰信号以及噪声之间不相关,各干扰之间也是不相关的,则阵列数据的相关矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= \mathbf{E}[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] \\ &= \mathbf{R}_{ss} + \mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_{nn} \\ &= \sigma_s^2 \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_0^H + \sum_{m=1}^M \sigma_m^2 \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\sigma_s^2$ ,  $\sigma_m^2$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ )以及 $\sigma_n^2$ 分别为期望信号, $M$ 个干扰信号以及噪声的功率.

各路信号经阵列权矢量 $\mathbf{w}$ 加权求和后得到阵列输出信号为

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i^* x_i(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (12)$$

### 3.2 有限测试距离对方向图的影响

不同于固定波束阵列天线,自适应天线阵的权矢量采用自适应算法计算.讨论最为经典的PI算法. PI (Power Inversion)算法是零陷类波束形成的典型代表,属于线性约束最小方差准则(LCMV)的一种特殊情况.

LCMV 准则是在约束有用信号方向的响应为常数(通常置为 1)的基础上,使输出功率最小,从而抑制干扰信号,用公式表达为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \min_w P_{\text{out}} = E\{|y(t)|^2\} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{s}_0 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{s}_0$ 为先验的期望信号导向矢量,但是通常情况下期望信号导向矢量是未知的,此时可以采用更为宽松的约束条件.

PI 算法就是一种采用更为宽松条件约束下的 LCMV 算法. PI 算法的思路是以某一个阵元接收信号作为参考,调整其它支路的阵列加权使阵列的输出功率最小.假如以第一阵元为参考通道,则取约束向量为  $\mathbf{b} = [1, 0, \dots, 0]^T$ ,用公式表达如下:

$$\begin{cases} \min_w P_{\text{out}} = E\{|y(t)|^2\} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{b} = 1 \end{cases} \quad (14)$$

所以 PI 算法的数学本质就是一个条件极值问题,可以用拉格朗日乘子法进行求解.构造拉格朗日函数

$$L(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} + \alpha (\mathbf{w}^H \mathbf{b} - 1) \quad (15)$$

令  $\nabla_w L(\mathbf{w}) = 0$ ,

$$\mathbf{w}_{\text{PI}} = \alpha \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b}^* \quad (16)$$

由约束条件可得拉格朗日系数  $\alpha = 1/(\mathbf{b}^* \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b})$ .

所以,根据式(2),PI 算法在球面场和平面场下的方向图分别为

$$F_{\text{PI}}(\theta, \phi) = [\alpha \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b}^*]^H \mathbf{v}(\theta, \phi) \quad (17)$$

$$F'_{\text{PI}}(\theta, \phi) = [\mu \mathbf{R}'_{xx} \mathbf{b}^*]^H \mathbf{v}'(\theta, \phi) \quad (18)$$

观察式(11)接收数据的二阶统计特性,可以看到在各接收信号相对独立的场景中,接收数据协方差等于期望信号协方差,干扰信号协方差以及噪声协方差之和.对于典型的 GNSS 接收机,天线口面的信号功率约为  $-130\text{dBm}$ ,噪声功率约为  $-110\text{dBm}$ ,即,  $\sigma_s^2 \ll \sigma_n^2$ ,所以,忽略式(11)的第一项有

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &\approx \sum_{m=1}^M \sigma_m^2 \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H + \sigma_n^2 \mathbf{I} \\ &= \mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_{nn} \\ &\equiv \mathbf{R}_{nj} \end{aligned} \quad (19)$$

根据空间谱估计理论<sup>[15]</sup>,由于上述干扰噪声协方差矩阵为满秩矩阵(各通道噪声始终存在),可以进行特征分解如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{nj} &= \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \\ &= \sum_{i=1}^M \lambda_i \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H + \sum_{i=M+1}^N \sigma_n^2 \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $M$ 个干扰特征值  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, M)$ 和  $(N-M)$ 个噪声特征值  $\sigma_n^2$ 为协方差矩阵的  $N$ 个特征值; $\mathbf{e}_i (i=1, 2, \dots, M)$ 和  $\mathbf{e}_i (i=M+1, 2, \dots, N)$ 为对应的特征向量,二

者张成的空间为相互正交的干扰子空间和噪声子空间.

根据式(16),PI 算法的权值可以写成

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{\text{PI}} &= \alpha \mathbf{R}_{nj}^{-1} \mathbf{b}^* \\ &= \alpha \left[ \sum_{i=1}^M \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* + \sum_{i=M+1}^N \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* \right] \\ &= \frac{\alpha}{\sigma_n^2} \left[ \sum_{i=1}^M \frac{\sigma_n^2}{\lambda_i} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* + \sum_{i=M+1}^N \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* \right] \end{aligned} \quad (21)$$

由于干扰环境中干扰功率远大于噪声功率,即  $\lambda_i \gg \sigma_n^2 (i=1, 2, \dots, J)$ 时,可以得到

$$\mathbf{w}_{\text{PI}} = \frac{\alpha}{\sigma_n^2} \sum_{i=M+1}^N \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* \in N_n \quad (22)$$

式中, $N_n$ 表示噪声子空间.可见有限测试距离造成的导向矢量误差不会改变权矢量落在噪声子空间的特性.由于干扰导向矢量张成的空间与干扰子空间为同一空间,则干扰导向矢量与权矢量正交,有

$$F(\theta_j, \phi_j) = \left[ \frac{\alpha}{\sigma_n^2} \sum_{i=M+1}^N \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i^H \mathbf{b}^* \right]^H \mathbf{v}(\theta_j, \phi_j) = 0 \quad (23)$$

式(23)表明,有限距离条件下自适应方向图仍能在干扰方向形成零陷.因为有限距离造成的导向矢量误差可以被权值自适应补偿,故不影响阵列的干扰抑制能力.而对比式(14)和式(15),有限测试距离对方向图其他位置的影响则难以判定.所以在 2.3 节数值仿真中,我们分别采用特定场景的方向图零陷和任意场景的平均输出性能来分析有限距离误差对 GNSS 抗干扰天线阵性能的影响.

### 3.3 数值仿真

#### 3.3.1 特定场景方向图对比

同样以三阵元直线阵为例进行特定场景下有限测试距离影响的仿真分析.仿真中采用的参数详见表 2. B3 民码信号为扩频信号,带宽为  $20.46\text{MHz}$ ,载噪比为典型值  $44\text{dB-Hz}$ ,则信噪比 SNR 约为  $-30\text{dB}$ .仿真的测试距离仍然选取表 1 所示距离.采用 PI 算法进行自适应处理得到阵列权值,进一步计算阵列方向图.

表 2 仿真中用到的参数

参数类型	参数取值
天线阵型	间距为半波长的 3 元线阵
GNSS 信号类型	北斗 B3 民码信号
信号入射角	俯仰角 0 度,方位角 0 度
干扰类型	20 MHz 宽带高斯干扰
干扰干噪比	50 dB
干扰入射角	俯仰角 0 度,方位角 45 度

图 4 给出了不同测试距离情况下的特定干扰场景自适应方向图.可以看出无论什么距离,自适应天线阵都能形成基本一样深度的零陷(存在若干 dB 的误差,但零陷深度远均在  $-80\text{dB}$  以下,干扰残余可忽略),验

证了理论分析中有限测试距离不影响自适应天线阵干扰抑制能力的结论. 另一方面, 测试距离太小时, 方向图非零陷部分的增益与理论方向图增益存在一定的偏差. 图 5 给出了不同测试距离下方向图与理论方向图的增益误差. 当测试距离为 10 倍远场距离条件时(距离 4.73m), 非零陷部分的增益误差小于 0.3dB.

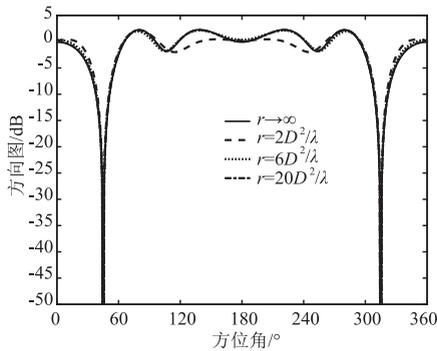


图4 不同测试距离下的自适应方向图

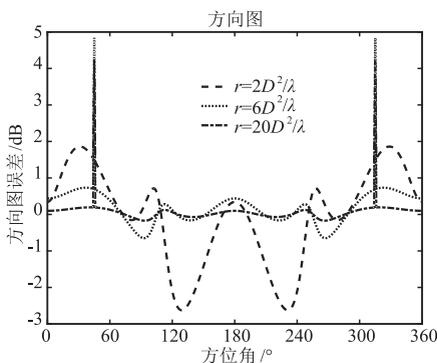


图5 不同测试距离下方向图与平面场方向图误差

### 3.3.2 任意场景阵列可用性

本文采用平均阵列增益覆盖率来评价有限距离测量误差在任意场景下天线阵的可用性能. 随机生成 100 组干扰方向(0~360°内平均分布), 取其中一组作为固定干扰来向, 信号以一定的步进(仿真中取 1 度)遍历方位角, 得到每一组信号入射角下的输出阵列增益, 计算阵列增益超过某一阈值的百分比, 即为阵列增益覆盖率. 对 100 组干扰方向进行蒙特卡洛仿真, 对覆盖率进行平均, 即得到平均阵列增益覆盖率.

图 6 给出了不同测试距离下的平均阵列增益覆盖率曲线. 可以看到各曲线基本重合, 比如在阵列增益阈值为 -5dB 时, 各种测试距离下的覆盖率均在 90% 以上, 阈值为 -3dB 时, 覆盖率均在 70% 左右. 所以可以认为有限测试距离对抗干扰天线阵的平均性能影响可以忽略.

### 3.4 小结

由于抗干扰天线阵可以用权值自适应地抵消有限测试距离导致的导向矢量误差, 所以有限距离误差对

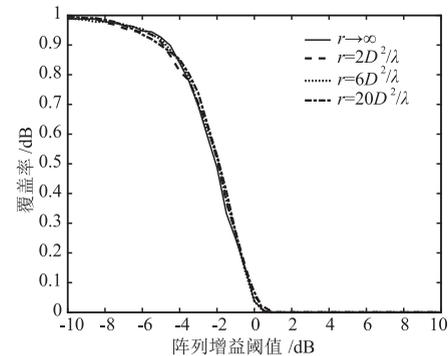


图6 不同测试距离下的平均阵列增益覆盖率曲线

零陷形成没有影响. 另一方面, 从任意场景平均性能的角度分析了有限测试距离造成的非零陷部分增益偏差对抗干扰输出性能的影响, 结果表明, 只要测试距离满足最小远场条件, 有限测试距离的影响即可忽略.

## 4 结论

本文在就抗干扰天线阵的暗室远场测试进行了研究, 分析了固定波束形成以及自适应处理两种天线阵工作模式下, 有限距离引入的测试误差的区别. 结果表明, 有限测试距离对固定波束阵列方向图的主瓣影响不大, 但是会影响波瓣零点位置及深度, 符合传统结论. 对于自适应天线阵, 有限测试距离对零点的位置及深度都不造成影响, 对方向图零点以外的增益产生若干 dB 的误差, 但并不会造成显著的接收机输出性能恶化.

上述结论对于抗干扰测试的微波暗室的建设尺寸的考虑, 对抗干扰测试的性能评估等方面具有重要的参考意义.

### 参考文献

- [1] 贾琼琼, 吴仁彪, 王文益, 等. 满足高精度测量的 GNSS 自适应干扰抑制算法[J]. 电子学报, 2018, 46(11): 2753-2760.  
JIA Qiong-qiong, WU Ren-biao, WANG Wen-yi, et al. GNSS adaptive interference suppression algorithm for high accuracy measurement[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11): 2753-2760. (in Chinese)
- [2] 周万幸. 一种新型极化抗干扰技术研究[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 454-458.  
ZHOU Wan-xing. Research of a new type techniques for anti-interference using polarization[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 454-458. (in Chinese)
- [3] 崔建华, 程乃平, 倪淑燕. 阵列天线抑制欺骗式导航干扰信号方法研究[J]. 电子学报, 2018, 46(2): 365-371.  
CUI Jian-hua, CHENG Nai-ping, NI Shu-yan. Research on spoofing suppressing method using antenna array for navigation signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(2): 365

- 371. (in Chinese)
- [4] DANA Howell, DENICE Jacobs. AFRL navigation warfare (NAVWAR) testbed [A]. Proceedings of ION-GNSS 20th International Technical Meetings of the Satellite Division [C]. Savannah, GA, 2009. 147 - 154.
- [5] 杨博, 郭淑霞, 刘宁. 基于大型微波暗室的卫星导航接收机测试 [A]. 第一届中国卫星导航学术年会 [C]. 北京, 2010. 438 - 443.  
YANG Bo, GUO Shu-xia, LIU Ning. GNSS receiver test in large anechoic chamber [A]. CSNC [C]. Beijing, 2010. 438 - 443. (in Chinese)
- [6] FREDERIC L, SOLENE B, ERWAN G, HERVE L. Anti-jam protection by antenna [J]. GPS Solution, 2013, (3): 111 - 116.
- [7] ALISON B, DAVID M. Test results of a 7-element small controlled reception pattern antenna [A]. Proceedings of ION GPS 2001 [C]. Salt Lake City, UT, 2001. 2022 - 2029.
- [8] WILLIAMS L, STEVE C, JEREMY C, PETER C, STEVE S. Four-element adaptive array evaluation for united states navy airborne applications [A]. Proceedings of ION GPS 2000 [C]. Salt Lake City, UT, 2000. 2523 - 2532.
- [9] KRAUS J D, MARHEFKA R J. Antennas: For All Applications (3rd Edition) [M]. The McGraw-Hill Companies, 2002. 520 - 587.
- [10] BALANIS C A. Antenna Theory Analysis and Design (3rd Edition) [M]. New York: John Wiley&Sons, 2005. 560 - 597.
- [11] HANSEN R C. Measurement distance effects on low side-lobe patterns [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, (6): 591 - 594.
- [12] UNO T, ADACHI S. Range Distance requirements for large antenna measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, (6): 707 - 720.
- [13] 邵江达, 李浚沛. 极低副瓣天线远场测量的新方法 [J]. 现代雷达, 1998, (3): 73 - 79, 100.  
SHAO Jiang-da, LI Jun-pei. A new far field measurement method for ultra-low sidelobe antenna [J]. Modern Radar, 1998, (3): 73 - 79, 100. (in Chinese)
- [14] 王永良, 丁前军, 李荣峰. 自适应阵列处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
WANG Yong-liang, DING Qian-jun, LI Rong-feng. Adaptive Array Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 万群. 空间谱估计理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Yong-liang, CHEN Hui, PENG Ying-ning, WAN Qun. Spatial Spectrum Estimation Theory and Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

#### 作者简介



房晓丽 女, 1985 年出生, 山东寿光人. 2012 年毕业于云南民族大学电气信息工程学院, 获得硕士学位, 现为湖南信息学院通信工程教研室主任, 讲师. 主要研究方向为 GNSS 抗干扰技术等.

E-mail: feixuepiaoyin@126.com



吴礼杰 男, 1985 年出生, 湖南常德人. 2012 年获得信号与信息处理硕士学位, 现为国防科技大学导航与时空技术工程研究中心射频组工程师, 主要研究方向为射频通信技术.