

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107895

# 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪算法

苗峻<sup>1,2</sup> 窦修全<sup>1,2</sup> 聂宏印<sup>1,2</sup> 刘长远<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081; 2. 河北省电磁频谱认知与管控重点实验室 石家庄 050081)

**摘要:** 干涉仪测向算法通过将接收信号相位差与本地相位差样本进行拟合从而获得信号的来波方向,具有布阵灵活、计算量小等特点,工程应用性较高。但由于存在天线工艺误差以及接收机幅相特性不一致等因素,导致了相位误差的引入。当相位误差具有较大时变性时,本地相位差样本的校准作用将会失效,从而严重影响干涉仪测向算法的性能。为提高干涉仪算法在相位扰动条件下的测向稳定性,提出了一种基于天线响应幅度修正的干涉仪测向算法及其优化方法,通过将信号接收幅度引入算法并做加权处理,降低了干涉仪算法的测向误差和对系统幅相一致性的要求。经计算机仿真验证,不同时变相位误差条件下,优化后的干涉仪算法其测向平均误差仅为传统干涉仪测向算法的38%,提高了算法在干扰条件下的精度和稳定性。

**关键词:** 干涉仪;测向;干扰;算法修正

**中图分类号:** TN971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

## A direction-finding method of interferometer array based on antenna response anisotropy

Miao Jun<sup>1,2</sup> Dou Xiuquan<sup>1,2</sup> Nie Hongyin<sup>1,2</sup> Liu Changyuan<sup>1,2</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Spectrum Cognition and Control, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** When interferometer algorithm works, it uses the phase differences of signal and the phase differences in local data to calculate the DOA. The interferometer direction-finding method has been widely used in engineering because of its flexible and the small amount of calculation. However, because of the array fabrication errors and the receivers' inconsistent of phase, the accuracy of interferometer could be strongly affected as the calibration effect of local phase samples will fail when time-changing phase errors in present. Aiming at improving the algorithm stability in phase interference, we propose a refinement method of interferometer algorithm based on the response anisotropy of array and its optimized version, both of which improve the algorithm accuracy and weaken the dependence on the system's phase consistency. Furthermore, computer simulation verifies that under the condition of different phase errors, the average directional error of the optimized interferometer algorithm is reduced to 38% compared with traditional interferometer algorithm, which shows that the accuracy and stability of the interferometer algorithm are significantly improved under interference conditions.

**Keywords:** interferometer; direction finding; interference; optimized method

## 0 引言

近年来,随着反辐射技术以及综合电子干扰等新技术飞速发展,传统的以主动雷达等有源探测系统为主的侦测手段逐渐受到制约,而作为有源探测有效补充的无源探测技术,将在未来信息化战场中发挥举足轻重的作用。而其中最重要的是对目标进行精确的测向定位<sup>[1]</sup>,因此被动测向定位技术作为无源探测领域的重要分支<sup>[2]</sup>,也一直是研

究的焦点问题。对辐射源的高精度测向是实现电子支援态势感知能力的基础关键技术,对电子支援系统<sup>[3]</sup>具有非常重要的意义。干涉仪测向算法因可实现工作空域、频带瞬时宽开<sup>[4]</sup>,且兼具结构简单、原理清晰等优点<sup>[5]</sup>,在现代电子战系统中得到了广泛应用。如美军 F-22 飞机 AN/AIR-94 无源探测定位系统和 F-35 飞机 AN/ASQ-239 电子战系统均采用了干涉仪测向技术体制<sup>[6]</sup>。

应用干涉仪系统测向时,需要对接收信号的相位与本

地样本库中的相位做相关运算<sup>[7]</sup>,并通过搜索相位相关拟合函数的谱峰位置估计信号方位。由于干涉仪测向原理可知,这种测向体制对系统的相位稳定性依赖度较高,当阵列天线或接收机存在较大时变相位误差时,将严重影响干涉仪算法的性能。

目前针对干涉仪测向算法的优化主要集中在解模糊算法上,如虚拟基线法<sup>[8]</sup>、立体基线法<sup>[9-10]</sup>、旋转基线法<sup>[11]</sup>、非均匀圆阵法<sup>[12]</sup>等,虽然在一定条件下都能解决测向模糊的问题,但是由于对阵列形式、天线尺寸或者信号质量有较高要求,在一定程度上提高了系统的复杂性和局限性。基于干涉仪算法测向精度和误差修正的优化算法,也有相关学者开展了研究。王思佳等<sup>[13]</sup>通过仿生学提高了测向精度,但研究方向主要在电路实现上;韩田田<sup>[14]</sup>提出了一种基于接收通道切换的幅相误差修正方法,但是仅在幅相特性为慢变化时适用;胡知非<sup>[15]</sup>将基于四阶累积的 MUSIC 算法与干涉仪椭圆阵列相结合,通过虚拟真元拓展阵列孔径,在提升测向精度的同时计算量也显著提升;李智东<sup>[16]</sup>通过修正干扰下的阵列接收模型,改善了基于非均匀圆阵的干涉仪测向算法的性能,但是仅考虑了诸如阵元耦合等固定误差。

为了进一步提升干涉仪算法在时变性相位误差下的测向精度和算法稳定性,本文提出一种基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法及其优化方法,将接收信号幅度的差异性引入干涉仪算法,提高了信源信息利用率,降低了干涉仪算法对系统幅相一致性的要求,提升算法在不同干扰条件下的稳定性。同时,本文方法也具有较为普遍的适用性,能够为上述学者的研究提供补充和参考。

## 1 干涉仪测向模型

为方便描述且不失一般性,本文中均以单基线均匀线阵为例进行模型推导。单基线干涉仪测向原理如图 1 所示。

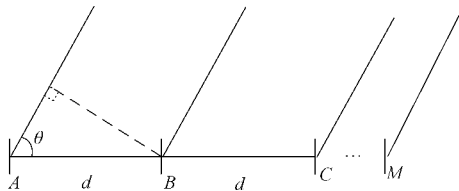


图 1 单基线干涉仪测向

设  $A, B, C, \dots, M$  为一条基线上的天线单元,相邻阵元间距为  $d$ ,入射信号的波长为  $\lambda$ ,角度为  $\theta_d$ ,以阵元  $A$  为参考阵元,信号波前到达天线阵元  $A, B$  时的相位差为  $\Psi_{BA}$ ,则:

$$\Psi_{BA} = 2\pi d \cos\theta_d / \lambda \quad (1)$$

由于阵列为等间距阵,可由式(1)可得:

$$\Psi_{CA} = 2\Psi_{BA} \quad (2)$$

...

$$\Psi_{MA} = (M-1)\Psi_{BA} \quad (3)$$

因此,当阵列位置及信号频率确定时,在搜索角度范围内可确定唯一一组相位差序列:

$$\Psi_{\theta_d} = [\Psi_{BA} \ \Psi_{CA} \ \dots \ \Psi_{MA}] \quad (4)$$

同时,在本地会保存选定频率和角度的相位差样本群,当频率为  $f_0$ 、角度为  $i$  时的一组本地样本群为:

$$\Psi_{f_0-i} = [\Psi_{f_0-BA-i} \ \Psi_{f_0-CA-i} \ \dots \ \Psi_{f_0-MA-i}] \quad (5)$$

其中,  $\Psi_{f_0-BA-i}$  表示当频率为  $f_0$  时,  $B, A$  阵元间在来波方向角度为  $i$  时的相位差。

之后,可令接收信号相位差与本地相位差样本群做拟合,即:

$$P(\theta) = f(\Psi_{\theta} - \Psi_{f_0-i}) \quad (6)$$

在理想条件下,当信号来波方位  $\theta = \theta_d$  与拟合样本对应的角度  $i$  相等时,有  $\Psi_{\theta_d} = \Psi_{f_0-i}$ ,此时在空间谱  $P(\theta_d) = f(0)$  处产生全局最大值,从而求解出信号的来波角度。

## 2 干涉仪测向误差模型

但是在实际工程应用中,阵列天线存在工艺误差,并且接收机各通道间也会由于元器件的差异产生幅相特性的不一致,从而将产生相位误差。当相位误差具有时变特性时,本地相位差样本库的相位校准作用将失效。时变性相位误差的引入将影响其与本地相位差样本群的拟合结果,导致在信号来波方向  $P(\theta_d)$  处峰值不明显,甚至低于干扰峰从而无法解算出正确的来波方向。

令阵列各接收通道产生的相位误差为:

$$\Delta\theta = [\Delta\theta_{BA} \ \Delta\theta_{CA} \ \dots \ \Delta\theta_{MA}] \quad (7)$$

其中  $\Delta\theta_{BA}$  为阵元  $B, A$  间产生的相位误差,此时接收信号在各个阵元间的相位差为:

$$\Psi'_{BA} = (2\pi d \cos\theta / \lambda) + \Delta\theta_{BA} \quad (8)$$

$$\Psi'_{CA} = (2 * 2\pi d \cos\theta / \lambda) + \Delta\theta_{CA} \quad (9)$$

...

$$\Psi'_{MA} = [(M-1) * 2\pi d \cos\theta / \lambda] + \Delta\theta_{MA} \quad (10)$$

从而构成含相位误差的相位差序列:

$$\Psi'_{\theta_d} = [\Psi'_{BA} \ \Psi'_{CA} \ \dots \ \Psi'_{MA}] \quad (11)$$

令接收信号相位差与本地相位差样本群做拟合,得到:

$$P(\theta) = f(\Psi'_{\theta_d} - \Psi_{f_0-i}) \quad (12)$$

此时,当信号来波方位  $\theta = \theta_d$  与拟合样本对应的角度  $i$  相等时,有:

$$\Psi'_{\theta_d} - \Psi_{f_0-i} = \Delta\theta \quad (13)$$

由于  $\Psi'_{\theta_d} - \Psi_{f_0-i} \neq 0$ ,因此拟合后的空间谱在  $P(\theta_d)$  处的峰值效应将被削弱,当  $\Delta\theta$  干扰较大时,甚至可能存在  $P(\theta_d) = P(\Delta\theta)$  处不再为空间谱函数全局最大值的情况,从而无法得到正确的测向结果。

## 3 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向模型

由前两节的推导可知,传统干涉仪测向算法主要利用了信号的相位信息,对于信号的幅度信息则不太关注。基

于进一步提高信源信息利用率的考虑,团队提出了一种基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法,利用阵列中各阵元对不同角度来波的响应规律(即天线各向响应的不一致性)作为传统干涉仪测向算法的补充,通过相位与幅度的双拟合函数构造空间谱,达到提高测向精度和算法稳定性的目的。

考虑阵列天线接收幅度时,阵列形式同图 1 所示,以  $A$  为参考阵元,此时阵元  $A$  对数据的接收模型可表示为:

$$y_A(t) = |r_{A_{\theta_d}}| e^{2\pi f t + \theta_0} \quad (14)$$

其中,  $|r_{A_{\theta_d}}|$  为阵元  $A$  在  $\theta_d$  角时的响应的模,  $\theta_0$  为信号到达阵元  $A$  时的初始相位。

此时,其他阵元的接收信号(考虑相位误差)可表示为:

$$y_B(t) = |r_{B_{\theta_d}}| e^{2\pi f t + \theta_0 + \Psi_{BA} - \Delta\theta_{BA}} = |r_{B_{\theta_d}}| e^{2\pi f t - \theta_0 - \Psi'_{BA}} \quad (15)$$

...

$$y_M(t) = |r_{M_{\theta_d}}| e^{2\pi f t + \theta_0 + \Psi_{MA} - \Delta\theta_{MA}} = |r_{M_{\theta_d}}| e^{2\pi f t + \theta_0 + \Psi'_{MA}} \quad (16)$$

此时,信号的相位差序列同式(11),信号的幅度序列为:

$$\mathbf{r}_{\theta_d} = [|r_{B_{\theta_d}}| \ |r_{C_{\theta_d}}| \ \cdots \ |r_{M_{\theta_d}}|] \quad (17)$$

在本地会保存相位差样本群:

$$\Psi_{f_0-i} = [\Psi_{f_0-BA-i} \ \Psi_{f_0-CA-i} \ \cdots \ \Psi_{f_0-MA-i}] \quad (18)$$

$\Psi_{f_0-BA-i}$  表示当频率为  $f_0$  时,  $B$ 、 $A$  阵元间在来波方向角度为  $i$  时的相位差。同时,本地样本群中还包含阵列响应序列:

$$\mathbf{r}_{f_0-i} = [|r_{f_0-A-i}| \ |r_{f_0-B-i}| \ \cdots \ |r_{f_0-M-i}|] \quad (19)$$

$|r_{f_0-A-i}|$  表示当频率为  $f_0$  时,阵元天线  $A$  在来波方向角度为  $i$  时的幅度响应模值。

信号与本地样本群拟合时,相位差序列和幅度序列同时参与拟合,即:

$$P(\theta) = f_1(\Psi'_{\theta_d} - \Psi_{f_0-i}) + f_2(\mathbf{r}_{\theta_d} - \mathbf{r}_{f_0-i}) \quad (20)$$

当信号来波方位  $\theta_d$  与拟合样本对应的角度  $i$  相等时,由于相位误差的存在使得  $\Psi'_{\theta_d} - \Psi_{f_0-i} \neq 0$ ,因此拟合函数  $f_1$  在  $\theta_d$  处的峰值效应将被削弱,如果只进行相位差拟合则可能得到错误的解算结果。但是由于在式(20)中引入了幅度拟合,则当  $\mathbf{r}_{\theta_d} = \mathbf{r}_{f_0-i}$  或  $\mathbf{r}_{\theta_d} \approx \mathbf{r}_{f_0-i}$  时,拟合函数  $f_2$  将在  $\theta_d$  (即  $f_2(0)$ ) 处形成峰值。

综上所述,基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法其优势在于:当存在较大相位误差、传统干涉仪测向算法无法在  $\theta_d$  处形成峰值时,由于增加了信号幅度拟合函数,使得式(20)所示的空间谱函数在  $\theta_d$  处依然能够产生峰值,从而求解出正确的信号来波角度。

## 4 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法仿真

### 4.1 测向空间谱函数特性对比

采用均匀线阵作为接收阵列,信号载频为  $f_c = 1.800 \times 10^6$ , 处理中频为  $f_i = 37.5 \times 10^6$ , 采样频率为  $f_s = 150 \times 10^6$ , 阵

元数  $M=5$ , 阵元间距为  $d = \lambda/2$ , 阵列天线幅度不一致性为 2 dB, 信噪比为 12 dB, 当信号来波方向分别为  $20^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $80^\circ$  时,基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法与传统干涉仪测向算法的空间谱如图 2~4 所示。

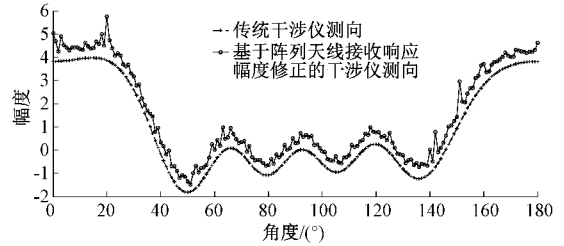


图 2 DOA=20°时的方向图谱

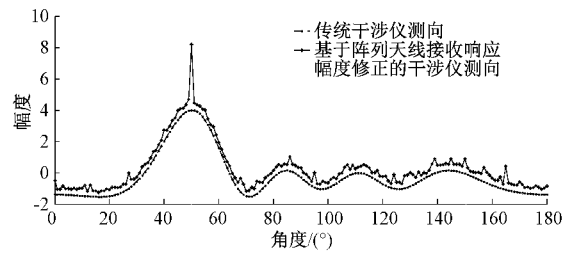


图 3 DOA=50°时的方向图谱

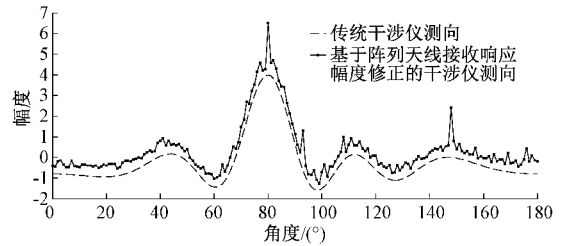


图 4 DOA=80°时的方向图谱

通过分析比较图 2~4,可以得到如下结论:

1) 在传统干涉仪测向体制中,空间谱函数较为平滑,且来波方向越接近  $90^\circ$ ,其空间谱在波达角处形成的谱峰越尖锐,因此信源方位角越接近阵列法线方向,测向精度越高。

2) 在基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向方法中,空间谱函数曲线斜率变化较大,这是因为阵列天线幅度响应在角度搜索范围内的变化是非渐变的,随机性较强,因此当接收信号和本地接收幅度样本群拟合匹配时,谱峰较为突出,表现出良好的测向能力,与理论模型相吻合。

3) 由于幅度拟合与信源方位角不具相关性,因此由基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向方法得到的空间谱函数谱峰受信源方位角变化的影响较小,在信号来波方向分别为  $20^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $80^\circ$  时,谱峰都较为尖锐,表现出较高测向精度和算法稳定性。

### 4.2 测向误差对比

采用均匀线阵作为接收阵列,信号载频为  $f_c = 1.800 \times 10^6$ , 处理中频为  $f_i = 37.5 \times 10^6$ , 采样频率为  $f_s = 150 \times 10^6$ , 阵

元数  $M=5$ , 阵元间距为  $d=\lambda/2$ , 阵列天线幅度不一致性为 2 dB, 信噪比为 12 dB, 信号来波方向为  $30^\circ$ , 当相位误差为  $2^\circ\sim 40^\circ$  时, 计算每个相位误差下, 100 次蒙特卡洛实验得到的测向误差均值, 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法与传统干涉仪测向算法的精度如图 5 所示。

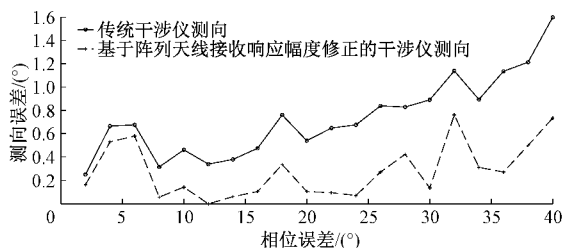


图 5 相位误差为  $2^\circ\sim 40^\circ$  时的测向误差

通过图 5 中两种算法测向误差曲线的对比可以得到如下结论:

1) 对传统干涉仪测向算法而言, 其测向误差随相位误差增加而增加, 结合本文第 2、3 节所述可知, 传统干涉仪测向算法主要是通过信号在阵列各阵元间的相位变化规律解算来波角度, 所以对相位误差更加敏感, 当相位扰动增加时, 算法的稳定性下降。

2) 对基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法而言, 其测向误差也随相位误差呈正相关规律变化, 但测向误差明显小于传统干涉仪测向算法。结合本文第 4 节可知, 该方法将阵列中各阵元对不同方向来波的响应幅度引入干涉仪测向算法, 以幅度拟合作为相位拟合的补充, 进一步提高了信源信息的利用率, 降低了测向结果对相位误差的敏感性, 从而提高了算法在相位扰动下的稳定性。

## 5 基于天线接收响应幅度加权修正的干涉仪测向算法

由上文对基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法理论模型的推导以及仿真结果可知, 当阵列天线各向响应的差异性较大时, 由于有幅度拟合作为相位拟合的补充, 相比于传统干涉仪算法, 该算法具有较高的测向分辨率、较小的测向误差以及较高的相位扰动稳定性。但是由于阵列响应幅度的差异具有较强的随机性, 使其拟合函数的谱峰更为尖锐, 导致在基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法中, 幅度拟合对测向结果的影响占比较大, 当天线响应幅度一致性较好或加性白噪声功率较高时, 会对测向结果造成较大干扰。下面通过仿真对上述现象进行说明。

采用均匀线阵作为接收阵列, 信号载频为  $f_c=1\ 800\times 10^6$ , 处理中频为  $f_i=37.5\times 10^6$ , 采样频率为  $f_s=150\times 10^6$ , 阵元数  $M=5$ , 阵元间距为  $d=\lambda/2$ , 信噪比为 10 dB, 信号来波方向为  $80^\circ$ , 相位误差为  $10^\circ$ , 当阵列天线幅度不一致性为  $0\sim 20$  dB 变化时, 分别计算每个天线各向响应幅度不一致

性条件下 100 次蒙特卡洛实验得到的测向误差均值, 如图 6 所示。

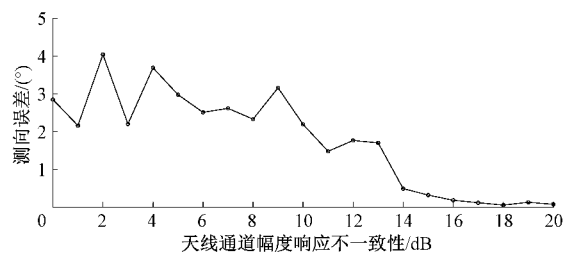


图 6 天线各向幅度响应不一致性为  $0\sim 20$  dB 时的测向误差

从图 6 所示的仿真结果中可以看出, 基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法, 其测向误差随天线不一致性的增强而降低, 当阵元间各向幅度响应差异较小时, 加性噪声对幅度特性的干扰增强, 从而导致幅度拟合匹配性降低、测向误差增大。因此, 引入幅度拟合后的干涉仪测向算法虽然提高了在相位扰动下的稳定性, 但是却对天线的各向异性提出了一定要求, 当阵列天线的响应差异性较弱时, 会对算法的测向结果产生影响。

基于上述情况, 课题组提出了基于天线接收响应幅度加权修正的干涉仪测向算法, 作为对文中第 4 节所提算法的优化, 通过加权系数的引入, 充分发挥相位拟合与幅度拟合相结合的优势, 进一步提高了算法的平衡性和稳定性。在改进算法中, 采用的加权形式如下:

$$P(\theta) = (1-a)f_1(\Psi' - \Psi_{f_{0-i}}) + af_2(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{f_{0-i}}) \quad (21)$$

其中,  $a$  为幅度拟合在测向空间谱中所占比重。结合图 5、6 所示的仿真结果可知, 当测向系统存在较大相位扰动时, 相位拟合误差增大; 而当天线各向幅度响应不一致性降低时, 幅度拟合匹配性较差导致测向误差增大。因此选择加权系数更加合理的思路为: 当天线各向幅度响应不一致性较低、而相位误差较小时, 幅度拟合在测向空间谱中所占比重较低, 相位拟合在测向空间谱中所占比重较高, 反之亦然, 从而实现双拟合函数的互补优势。因此, 可令权重系数  $a$  为天线各向幅度响应不一致性  $\Delta r_{f_{0-i}}$  和相位误差  $\Delta\theta$  的函数, 即:

$$a = F(\Delta r_{f_{0-i}}, \Delta\theta) \quad (22)$$

函数  $F(\Delta r_{f_{0-i}}, \Delta\theta)$  与  $\Delta r_{f_{0-i}}$  正相关而与  $\Delta\theta$  反相关, 此时, 式(21)可表示为:

$$P(\theta) = (1 - F(\Delta r_{f_{0-i}}, \Delta\theta))f_1(\Psi' - \Psi_{f_{0-i}}) + F(\Delta r_{f_{0-i}}, \Delta\theta)f_2(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{f_{0-i}}) \quad (23)$$

式(23)即为改进算法的空间谱函数。为了验证改进算法的性能, 对传统干涉仪算法、基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法和改进的基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法进行测向误差仿真, 分别对比了 3 种测向算法在相位扰动和幅度扰动下的测向稳定性, 得到的仿真结果如图 7、8 所示。

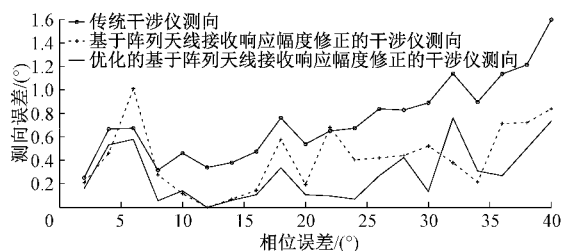


图7 相位误差对测向误差影响

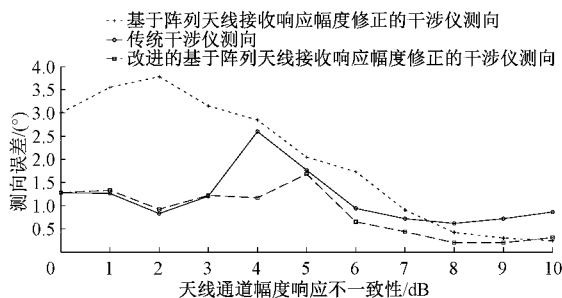


图8 天线通道不一致性对测向误差影响

通过对比分析仿真结果,可得到如下结论:

1)图7中,在阵列响应差异一定的条件下,随着相位误差的增加,传统干涉仪测向算法由于仅使用相位拟合,测向误差较大且随相位扰动的增大逐渐增加;而基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法及其改进算法由于在相位拟合的基础上引入了幅度拟合作为补充,所以虽然测向误差与相位误差呈正相关规律变化,但明显低于传统干涉仪算法在高相位扰动下的测向误差。其中,基于阵列天线接收响应幅度加权修正的干涉仪算法统计测向误差最小,其测向平均误差仅为传统干涉仪测向算法的38%。

2)图8中,当阵列天线各向幅度响应一致性变化时,由于此时相位误差一定(相位误差为 $10^\circ$ ),传统干涉仪测向算法由于没有采用幅度拟合,测向误差在 $1^\circ$ 上下浮动基本不随天线幅度响应差异性变化而变化;基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法,其空间谱函数由于是幅度拟合函数与相位拟合函数直接叠加,所以当天线幅度响应不一致性较低时,测向误差明显高于传统干涉仪算法;通过加权优化后,由于实现了幅度拟合与相位拟合占比的动态调节,降低了在天线响应幅度差异较小时加性噪声对测向结果的影响,测向误差明显低于前两种测向算法。

## 6 结 论

在传统干涉仪测向算法中,由于其测向体制为基于信号相位信息的拟合,所以对系统相位稳定性的依赖较大,相位干扰的存在会增加算法的测向误差。针对干涉仪测向在应用中遇到的这一技术问题,本文提出了一种基于阵列天线接收响应幅度修正的干涉仪测向算法以及对该算法的优化方法,将信号接收幅度拟合作为相位拟合的补充和修正,并且通过系数加权,实现了幅度拟合与相位拟合在空间谱

函数中占比的动态调节,使信号的幅度参量和相位参量能够在不同干扰源下实现参量间的互补和纠偏,降低了算法对单一信号特征(幅度、相位)稳定性的要求,充分发挥了双拟合函数的优势,从而提高了算法的测向精度以及算法在不同干扰因素下的稳定性。

## 参考文献

- [1] 吴双彤,刘兆华,高燕. 电子战环境中的雷达侦察系统研究[J]. 中国新通信,2018,20(6):244-244.
- [2] 李华会. 基于阵列合成的相关干涉仪测向算法的实现[D]. 重庆:重庆邮电大学,2017.
- [3] 高松,滕克难,段哲. 美军核心电子战支援装备及其发展趋势分析[J]. 飞航导弹,2019(11):12-17.
- [4] 孙超,徐盼盼,柏如龙. 基于IFF信号单站无源定位技术研究[J]. 无线电通信技术,2018,44(2):192-196.
- [5] 吴白新,李钊,刘涛. 一种干涉仪测向解模糊的方法[J]. 电子技术与软件工程,2021(2):95-97.
- [6] 邱江,龙银东,廖羽宇. 不同基线的干涉仪测向误差分析[J]. 电子信息对抗技术,2020,35(5):16-19.
- [7] SUHAIL M K, ASHRAF A A, ABIMBOLA S A. Performance evaluation of correlative interferometry for angel of arrival estimation[J]. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, 2015, 6(1): 43-48.
- [8] SONG H L, FU Y Q, LIU X. Improved ambiguity-resolving for virtual baseline [J]. TELKOMNIKA, 2014, 12(1): 63-72.
- [9] 张春杰,李智东. 非均匀圆阵天线模型解模糊误差研究[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(8):1525-1529.
- [10] 司伟建,万良田. 立体基线算法的测向误差研究[J]. 火箭与制导学报,2012,32(4):13-17.
- [11] 张敏,郭福成,李腾,等. 旋转长基线干涉仪测向方法及性能分析[J]. 电子学报,2013,41(12):2423-2429.
- [12] 王永军,池浩. 非均匀圆阵列无模糊长基线干涉仪测向方法[J]. 现代防御技术,2020,48(2):55-59.
- [13] 王思佳,陈卫东. 奥米亚棕蝇听觉机制测向优化算法研究[J]. 电子测量技术,2018,41(18):139-144.
- [14] 韩田田. 基于通道切换的阵列幅相误差校正方法[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [15] 胡知非. 基于异形面干涉仪测向技术研究[D]. 江苏:江苏科技大学,2014.
- [16] 李智东. 测向解模糊算法及阵列误差校正技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.

## 作者简介

苗峻,硕士,工程师,主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail:icecoffee\_1989@hotmail.com

龚修全,硕士,高级工程师,主要研究方向为阵列信号处理、无源定位与跟踪。

E-mail:xiaodou6664@sin.com

聂宏印,硕士,助理工程师,主要研究方向为阵列信号处理。

E-mail:337579292@qq.com

刘长远,硕士,工程师,主要研究方向为阵列信号处理、无源定位。

E-mail:loysdhr@126.com