

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103860

基于相关峰的理论样本干涉仪测向算法^{*}

杨明洋 向长波 房鹏飞

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266000)

摘要:相关干涉仪是一种无源测向算法,具有计算复杂度低、抗干扰能力较强、样本依赖性较大的特点。为了减少相关干涉仪算法样本对环境的依赖,提高实际环境的测向精度,提出了一种基于理论样本的改进算法。该算法通过搜索相关矩阵的局部峰值、建立理论相关峰、计算相关峰评价系数(包含方差、峰度、偏度)、二次相关匹配的方法,在仅使用理论样本的条件下即可对来波信号进行精准测向。经过外场实验表明,在频段 340 MHz~3 GHz、信噪比 29~60 dB 区间内,改进算法的精度比传统采样算法在城市环境的测向精度高 0.8°,且测向性能稳定,多次实验的精度偏离未超过 1°。改进算法计算复杂度较高,测向时间为传统算法的 3~4 倍,在无高时效性要求的场景具有良好的实用价值。

关键词:理论样本;相关干涉仪;相关峰;评价系数;测向

中图分类号: U675.71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Direction finding algorithm of theoretical correlative interferometer based on correlation peak

Yang Mingyang Xiang Changbo Fang Pengfei

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266000, China)

Abstract: Correlation Interferometer is a passive direction finding algorithm, which has the characteristics of low computational complexity, strong anti-interference ability and sample's environment dependence. In order to reduce the dependence of the sample on the environment and improve the accuracy in actual working environment, an improved algorithm based on theoretical samples is proposed in this paper. By searching the local peak value of correlation matrix, establishing theoretical correlation peak system, calculating correlation peak evaluation coefficient (including variance, kurtosis, skewness), and quadratic correlation matching, the algorithm can accurately detect the direction of arrival signal with theoretical samples. Field experiments show that in the frequency band 340 MHz~3 GHz and the signal-to-noise ratio 29~60 dB, the accuracy of the improved algorithm is 0.8° higher than that of the traditional sampling algorithm in the urban environment. At the same time, the overall accuracy difference of many experiments is less than 1°. The improved algorithm has high computational complexity, and the cost of time is 3~4 times that of the traditional algorithm, and it has good practical value in scenarios without high timeliness requirements.

Keywords: theoretical samples; correlative interferometer; correlative peak; evaluation coefficient; direction finding

0 引言

对已知频率的无线电信号进行无源的波达方向测量称为无源测向,起源于雷电方向捕捉,该技术在军事、民用领域均发挥着重要的作用。军事上,主要用于通信、干扰、雷达等信源设备的方位测量^[1];民用领域中,主要用

于黑广播信号、黑飞无人机信号的定向^[2-7]。

相关干涉仪测向算法是一种无源测向算法,虽没有同频测向的能力,但该算法测向精度较高,具有一定的抗干扰能力,适应多种环境,在现实中应用较多。国内外学者在其改进方面做了许多工作。在优化相关系数代价函数方面,刘建华等^[8]使用空间距离作为相关系数的代价函数,利用向量夹角替代皮尔逊系数表示向量相关性,较

低了计算复杂度;李淳等^[9]提出了构建相位差三角函数的思想,通过构造复数向量解决相位差的办法处理实测相位差 2π 跳变的问题。在减少相关运算次数方面:杜政东等^[10]提出了基于基线引导的二维测向算法,该算法在搜索时先以两根长基线的相位差进行模糊搜索,在模糊区间内进行二次样本搜索匹配,减少了在整个空域搜索和相关计算的时间,但是无法避免在整个空域采样的问题;王占刚等^[11]利用遗传算法将运算时间减少为网格搜索法的 $1/1\ 600$ 。在方位角拟合方面,常采用少量采样后进行二维拟合,有效减少了采样时间,但牺牲了测向精度^[12-15],测向精度受采样间隔影响较大。在测向算法融合方面,李彦龙等^[16]指出相关干涉仪测向精度依赖于采样的样本质量,将相关干涉仪与多信号识别分类算法(multiple signal classification algorithm, MUSIC)相结合,利用相关干涉仪粗测结果作为 MUSIC 算法的先验知识,减少了协方差矩阵求解的计算量,提高了测向精度,但无法规避相关干涉仪测向结果匹配错误的情况;姚志成等^[17]利用相关比幅法对均匀圆阵天线的相邻阵子相位差进行解模糊处理,整体测向精度提高 2° ,但在特定的波达方向下解模糊成功率不高,受信噪比影响较高。上述的算法改进工作均未对实际测向环境中的由多径、串扰等因素引起的测向错误进行分析、优化。同时,业内在标准场对测向精度的测量过程中可对 10% 以内的野点(角度偏差大的频点)进行剔除优化,野点的形成与天线阵列接收环境密切相关,意味着实际测向过程中带有优化流程遗留的测向误差。

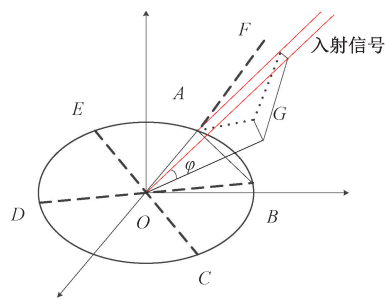
本文提出基于相关峰的理论样本改进算法,在相关运算后进行二次评价,减少因测向环境与样本环境差异而引入的测向误差。该算法无需进行远场样本采集工作,根据天线阵子方位关系,构造出理论的相位差样本库,对阵列天线的实测相位差矩阵进行评价,根据评价系数得到来波方向,修正因测向频率与采样频率差异而引入的测向误差。实验过程中,进行了 3 组数据对比,分别为采样环境下采样频点的测向结果分析、采样环境下非采样频点的测向结果分析、非采样环境下非采样频点的结果分析。通过 3 组实验对比分析,验证了本文改进算法的精度、稳定性。

1 基本原理

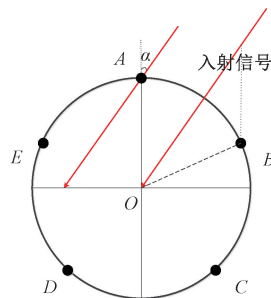
1.1 阵列模型

本文使用均匀圆阵为例进行原理分析^[18]如图 1 所示,图 1 中 A, B, C, D, E 为圆周均匀分布的天线阵元,标号 $m = 0 \sim 4$, O 为圆心参考阵元, α 为来波方向偏北角度, φ 为来波方向的俯仰角。

在远场条件下信号平行进入 O, A 阵元($L \gg 2 \times d^2/\lambda$



(a) 圆阵二维模型
(a) 2-D uniform circular array



(b) 圆阵底部投影
(b) Projection of uniform circular array

图 1 五阵元均匀圆阵

Fig. 1 Uniform circular array of five elements

或者 $L \gg \lambda/4$ 条件, d 为天线高度, λ 为波长)^[19],信号到达 O, A 点的波程差引起了接收机接收 O, A 阵元的初始相位差,用相位差代表光程差,记为 ϕ_{OA} 。以圆心点 O 为参考信号点,计算阵元 O 与参考阵元 A 相位差:

$$\phi_{OA} = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(2\pi \frac{m}{M} - \alpha) \times \cos\varphi \quad (1)$$

此时,可根据另外 4 个阵元求解出对应相位差矩阵 $\phi = [\phi_{OA}, \phi_{OB}, \phi_{OC}, \phi_{OD}, \phi_{OE}]$, 计算相位差矩阵与已有的样本数据 $\phi_{(f, \alpha, \varphi)}$ 的相关系数 ρ , 选取相关性最大的方位角 α 和俯仰角 φ 作为测量结果。

$$\rho = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \cos(\phi_{OA(i)} - \phi_{OA(i, \varphi, \alpha, f)}) \quad (2)$$

简单证明可知,当圆心参考点 O 偏离坐标圆心时,相位差矩阵 ϕ 与理论值出现偏差,但任意两个圆周阵元的相位差相减与理论值相同。

1.2 统计特征值

方差、偏度、峰度是数据分布的二、三、四阶中心矩,作为统计特征值常用于形容一组数据的分布情况。本文基于上述 3 个统计特征值,建立了评价相关峰的相关峰评价系数。

方差用于形容数据分布中与均值的离散度,计算公式如式(3)所示。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \quad (3)$$

式中: X_i 为第 i 个数据; $\bar{X}$ 为数据均值; N 为数据个数。

偏度用于形容数据分布的对称性,当偏度大于 0 时,称为正偏态;当偏度小于 0 时,称为负偏态;当偏度等于 0 时,说明数据分布对称。偏度计算公式如式(4)所示。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})^3]}{\sigma^3 \times N} \quad (4)$$

式中: X_i 为第 i 个数据; $\bar{X}$ 为数据均值; σ 为数据标准差; N 为数据个数。

峰度用于形容数据分布的胖瘦性,当峰度大于 0 时,数据分布相比于正态分布胖;当峰度小于 0 时,数据分布相比于正态分布瘦;当峰度等于 0 时,数据分布与正态分布相同。峰度计算公式如式(5)所示。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})^4]}{\sigma^4 \times N} - 3 \quad (5)$$

式中: X_i 为第 i 个数据; $\bar{X}$ 为数据均值; σ 为数据标准差; N 为数据个数。

相关峰评价系数主要用于对理论相关峰参数(使用理论样本计算)、实测相关峰参数(使用实测值和理论样本计算)的相关性进行评价。作者在实际测向过程中发现,按照式(2)进行相关匹配时,由于测向环境、测向样本引发误差的原因,来波方向出现在非最大峰值对应的方向,但包含在相关矩阵的局部峰值中,需要进行二次判断才能获取正确方位角。从物理含义理解,相关峰评价系数是一个对相关峰的离散度、尖锐程度、对称性的统一评价的系数,可对局部峰值从统计的角度进行描述,符合二次判断的要求。具体的计算公式如式(6)所示。

$$\rho' = a \times \left| \frac{V - V'}{V'} \right| + b \times \left| \frac{S - S'}{S'} \right| + c \times \left| \frac{K - K'}{K'} \right| \quad (6)$$

式中: V 、 S 、 K 分别表示实测相关峰的方差、偏度、峰度, V' 、 S' 、 K' 分别表示理论相关峰的方差、偏度、峰度; a 、 b 、 c 分别为各自的权重系数,经过多次实验分析、优化,目前 $a = 1$ 、 $b = 1$ 、 $c = 2$ 。

图 2 所示的频率为 1 126 MHz 时,图 2(a)为误差较小时主峰对应来波方向 115°(误差 2°);图 2(b)为误差较大时,主峰对应 15°。经过验证,主峰不是来波方向,而次峰对应来波方向 105°(误差 1°)。这种情况出现在测向频率大于半波长频率的频次较多,且主峰、次峰相关系数十分接近,当电磁波传播环境出现细微变化时,即会造成测向角度来回摆动的情况。

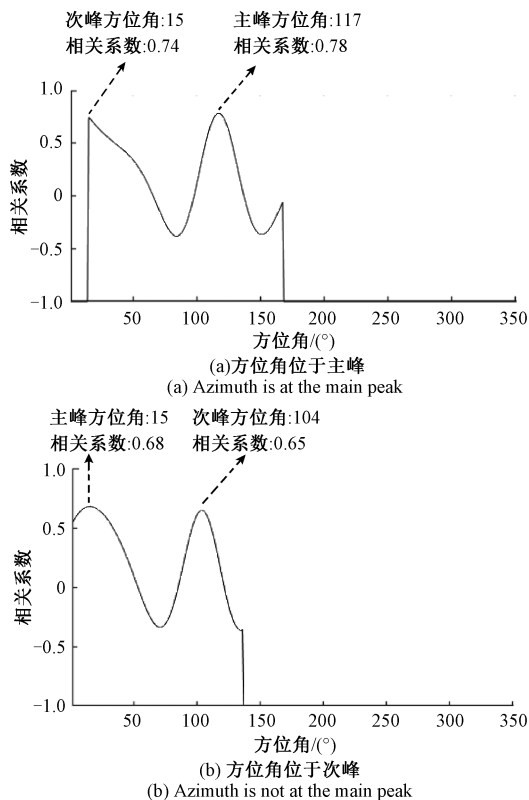


图 2 相关系数曲线最大峰值匹配问题

Fig. 2 Maximum peak matching of correlation matrix

2 测向算法流程

相关干涉仪算法引入了相关运算,解决了相位干涉仪算法在固定阵元情况下波长过短引发的相位模糊问题。传统采样算法采用样本相关的方法,将环境、设备误差合并计算,精度大幅度提高。但上述算法无法解决两个重要问题:1)多阵元测向天线加工工艺问题无法保证,每一套天线均需要单独采集样本,样本库不具有代表性,无法复用,造成算法的时间成本、经济成本增加;2)测向样本库只能标定在采样环境下的测向精度,而测向误差与测向环境关系紧密,无法保证在其他环境下的测向性能。而现有的任务需求中,在城市环境复杂中进行黑广播、干扰源等信源设备的搜索工作日渐增多,由实际测向环境与样本库不匹配引入的测向误差无法忽略。

基于上述原因,本文建立了理论相关峰及相关峰评价系数,提出了基于理论样本的测向算法。该算法使用理论样本,避免了采样过程、采样环境引入的误差影响,减少了同批次天线多次采样的冗余过程,可在相关矩阵的局部峰值中挑选正确的来波方向。

算法具体流程如图 3 所示。

1) 天线内部开关控制器将图 1 中阵元 O 和阵元 A 的射频信号引入双通道接收机,计算获取阵元 OA 的相

位差,记为 ϕ_{OA} 。

2) 轮切天线内部开关控制器,获取到阵元 O 与 A 、 B 、 C 、 D 、 E 的实测相位差矩阵 ϕ ,记为 $\phi = [\phi_{OA}, \phi_{OB}, \phi_{OC}, \phi_{OD}, \phi_{OE}]$ 。

3) 根据天线位置关系、测向频率,利用式(1)计算出理论样本库(假设俯仰角 0°),记为 $\phi'_i = [\phi'_{OA_i}, \phi'_{OB_i}, \phi'_{OC_i}, \phi'_{OD_i}, \phi'_{OE_i}]$, $i = 0 \sim 359$ 。

4) 利用式(2),代入理论样本库 ϕ'_i 计算出相关矩阵,记为 $C = [C_0 \cdots C_{359}]$ 。

5) 根据半波长频率进行算法选择, $Freq = c/(2 \times L)$,其中 L 为圆阵的直径, c 为光在空气中传播速度。当测向频率大于等于半波长频率时,进入步骤 6),称为相关峰评价理论算法;当测向频率小于半波长频率时,选取相关矩阵 C 中最大值对应的索引作为来波方向,称为传统理论算法。上述两种算法合并为基于相关峰的理论样本干涉仪测向算法。

6) 在相关矩阵中搜索局部峰值,以 N° 为前后搜索区间, 1° 为搜索步进,从 0° 开始向 359° 遍历。设遍历索引值为 i ,记录索引值为 j ,对应的相关系数为 C_i ,当存在以下关系时:

$$\begin{cases} C_i = \text{Max}(A_i) \\ A_i = [C_{i-N}, C_{i-N-1}, \dots, C_i, \dots, C_{i+N-1}, C_{i+N}] \end{cases}$$

将此索引对应角度标记为局部峰值,记为 $f(j)$, $j = j + 1$ 。当 A_i 中出现下标为负时,向数组尾部依次取值;当 A_i 出现下标超过 360 时,向数组前部依次取值。根据式(3)~(5),记录实测局部峰值 A_i 的二阶、三阶、四阶中心矩,记为 $V(j)$ 、 $S(j)$ 、 $K(j)$ 。

7) 根据步骤 6),遍历结束后得到局部峰值数组 $F = [f(1), f(2), \dots, f(M)]$ 和方差数组 V 、偏度数组 S 、峰度数组 K ,式中 M 为局部峰值数组个数。

8) 根据数组 F ,计算理论相关峰评价参数:设索引值为 $i = F(j)$, $j = 1, j \leq M$,根据式(2)将 ϕ'_i 代入样本库 ϕ' 计算相关得到相关矩阵,取第 $f(j)$ 及前后 N 个相关系数计算方差、偏度、峰度,记为 $V(j)'$ 、 $S(j)'$ 、 $K(j)'$, $j = j + 1$ 。

9) 根据步骤 7) 整理得到理论相关峰的方差数组 V' 、偏度数组 S' 、峰度数组 K' 。

10) 计算相关峰的评价系数 $\rho_i' = a \times \left| \frac{V(i) - V(i)'}{V(i)'} \right| + b \times \left| \frac{S(i) - S(i)'}{S(i)'} \right| + c \times \left| \frac{K(i) - K(i)'}{K(i)'} \right|$, $i = 1 \sim M$, $a = 1, b = 1, c = 2$ 。

11) 根据步骤 10) 的结果,选取评价系数最小的值对应的索引为来波方向。

步骤 6)~9) 是局部峰值搜索和匹配过程,在上述过程中可根据不同特性的天线修改具体的搜索流程。本文

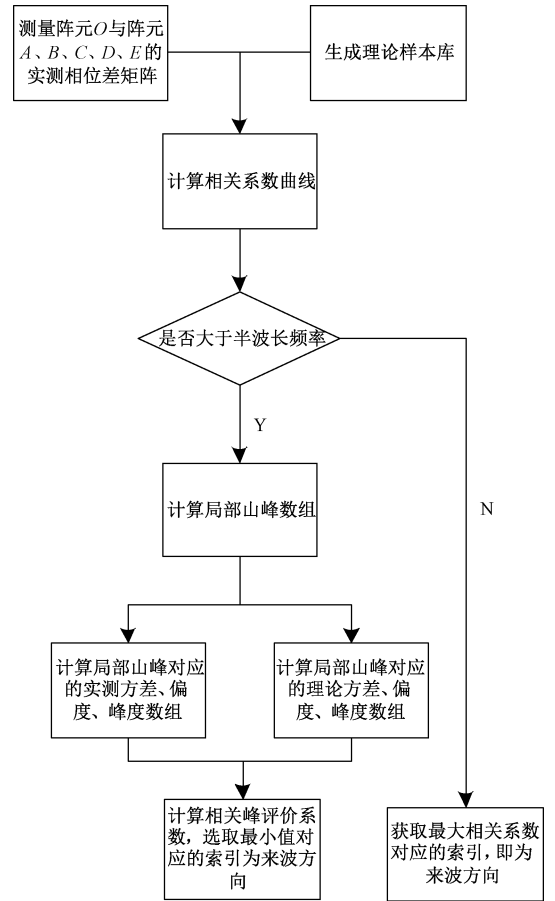


图 3 理论样本算法流程

Fig. 3 Flow chart of correlation peak evaluation

使用的方法是根据阵元幅度筛选的方法^[20]:当图 1 的圆周 5 阵元均为方向性天线、圆心为全向天线时,根据单一阵元幅度对来波方位角进行粗判断,将非粗区间的相关系数标记为-1,然后再进行相关峰搜索、匹配,减少计算复杂度。

3 实验结果

为了验证理论样本算法的有效性、准确性、抗环境干扰性,课题组在城市环境中做了两次外场实验。

实验 1,测向环境如图 4 所示,接收环境良好,发射环境复杂。信源为 KeySight 8257,接收机为 Ceyear 3943B,测向频率为 340 MHz~3 GHz,发射功率 10 dbm,发射天线与测向天线距离 10 m、离地 2 m。测向天线为圆周 8 阵元、圆心 1 阵元的圆阵天线,发射天线为定向天线。

为了与传统采样算法进行对比,实验开始前对进行一维样本搜集,样本频点称为采样频点,样本的角度步进为 5° ,采样频率为 340 MHz~3GHz,其中 340~500 MHz 频段步进 5 MHz 共 32 个频点,500 MHz~1.3 GHz 频段步

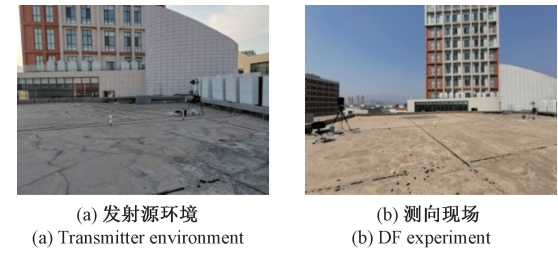


图 4 测向实验场景

Fig. 4 Scene of direction finding experiment

进 10 MHz 共 70 个频点、1.3~3 GHz 频段步进 20 MHz 共 85 个频点。实验结果分为两个部分,采样频点分析和非采样频点分析。采样频点的实验结果如表 1 和图 5、6 所示。

表 1 采样环境、采样频点的测向误差

Table 1 Direction finding error of sampling frequency in sampling environment

频段/MHz	测向误差/(°)		
	传统理论算法	本文算法	传统采样算法
340~500	8.4	8.4	5
500~1 300	4.4	4.4	0.9
1 300~3 000	13	5.4	0.3
340~3 000	9.5	5.3	2.2

在采样环境下对采样频点的测向实验结果如图 5 所示,从总体上看,3 种算法整体上呈现频率与测向性能正比的关系,测向误差从小到大排列,传统采样算法 2.2°、本文理论算法 5.3°、传统理论算法 9.5°。根据图 6 数据,本文的信噪比最低为 29 dB,最高为 61 dB,平均信噪比为 44 dB,电磁背景良好。

传统采样算法在频率高端(500 MHz~3 GHz)表现出了优异的测向性能,测向精度分别为 0.9°(500~1 300 MHz)和 0.3°(1 300~3 000 MHz),这是由于采样和验证的位置、频点未改变,电磁波在该环境下的传播路径相对稳定,传统采样算法将由环境误差、天线误差引起的相位误差匹配带有类似误差的样本,故匹配测向精度高。该算法在频率低端(340~500 MHz)测向效果偏差,测向误差为 5°,这是由天气(温度、湿度、反射系数)、空调压缩机工作等因素造成的此频段内电磁波的传播环境与采样不一致,个别天线阵元间相位差与采样时相差较大引起的。传统采样算法的结果反应了城市环境中进行精准测向的高难度,同时也反应出了该算法精度对电磁波传播环境的依赖性较高。

传统理论算法在在频率低端测向误差为 8.4°,比传统采样算法高 3.4°左右,造成的原因与传统采样算法相同,未出现误差较大的频点、方位。但该算法在频率高端

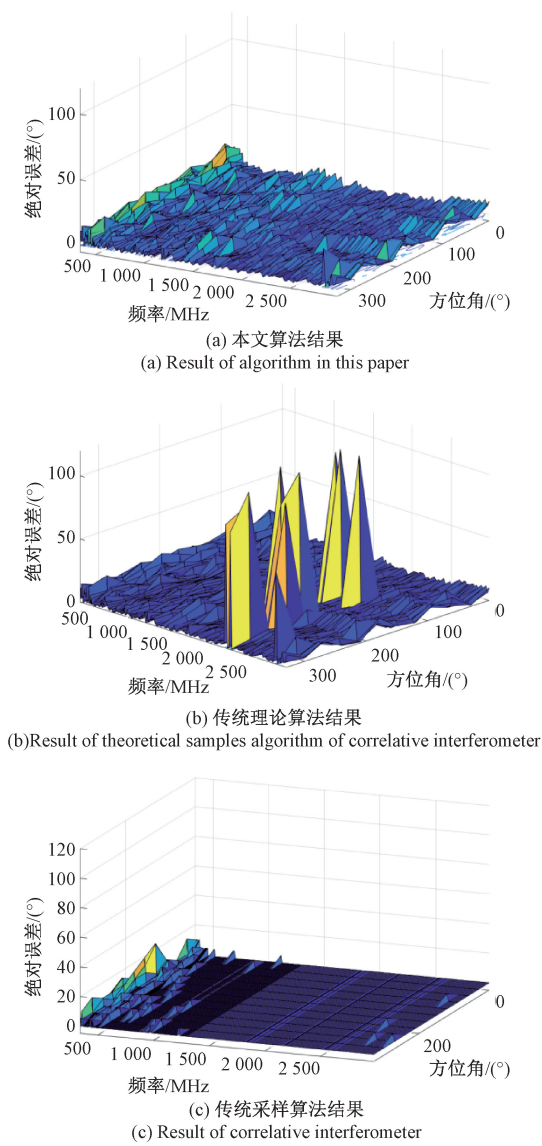


图 5 三维实验结果

Fig. 5 3-D results of the experiment

的测向误差较大,测向精度分别为 4.4°(500~1 300 MHz)和 13°(1 300~3 000 MHz),在 2 260 MHz 频点附近出现了多个高达 120°的误差方位角和误差频点。通过数据分析,发现引发的原因与图 2(b)相同,相关代价函数无法在局部峰值中正确区分来波方向。

本文建立的理论算法在频率低端与传统理论算法测向性能相同(采用相同的算法),在频率高端处于上述两种算法之间,测向精度分别为 4.4°(500~1 300 MHz)和 5.4°(1 300~3 000 MHz)。在频率高端,该算法通过相关峰评价系数正确区分出了来波方位角,避免了因误差造成的相关匹配失效。如图 7 所示,选择分析的数据频率为 2 260 MHz、来波方向为 340°,首先根据式(2)计算得到相关矩阵,判断半波长频率(750 MHz)后选择基于相

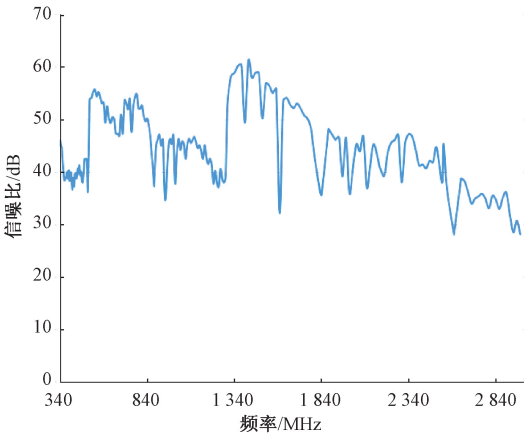


图 6 实验过程平均信噪比

Fig. 6 Average SNR during the experiment

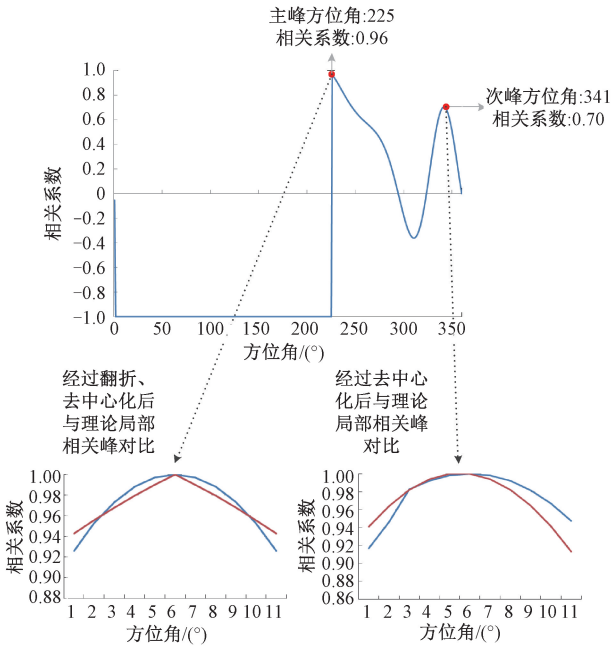


图 7 局部峰值匹配问题

Fig. 7 Problem of local peak matching

关峰评价系数理论算法。经过局部峰值搜索,主峰出现在 225°、次峰出现在 341°,且主峰相关系数远高于次峰。分析该数据时,由于主峰左半数据已被初筛剔除,考虑到理论样本、理论相关峰的对称性,将主峰进行镜像翻折和去中心化处理;将次峰进行去中心化处理。经过处理后,从视觉上可以明显感知,主峰与对应的理论相关峰的相似度比次峰和对应的理论相关峰的相似度高。通过相关峰评价系数计算,角度 225°的偏度溢出比为 82.578 1%、峰度溢出比为 15.631 4%、方差溢出比为 25.877 8%,相关峰评价系数为 1.241;角度 341°的偏度溢出比为 25.207 4%、峰度溢出比为 13.207 2%、方差溢出比为

5.122 34%相关峰评价系数为 0.43。基于相关峰评价系数,选择评价系数最小的 341°作为来波方位角,误差为 1°。

表 2 是在采样环境下对非采样频点的测向实验结果,传统采样算法在测向精度指标上优于改进算法,其精度在低频段比改进算法高 2.8°、在高频段比改进的理论算法分别高 1.5°(500~1 300 MHz)和 2.1°(1 300~3 000 MHz)。这是由于非采样频点与已储存的样本频率不一致,导致了非采样频点与采样频点的测向结果不一致。根据式(2),当阵元位置固定,阵元间相位差随频率变化而变化,8 个阵元相位误差累加引发了传统采样算法在非采样频点的测向误差增加。但本文的理论算法可以有效的避免这一情况,因为理论样本是随着测向频率改变,相位误差不会因为频率变化而增加。从采样频点、非采样频点的改进理论算法测向结果来看,3 个频段的测向误差均未超出 1°,从另一方面印证了本文改进算法的稳定性。

表 2 采样环境、非采样频点测向结果

Table 2 Direction finding error of non-sampling-frequency in sampling environment

频段/MHz	测向误差/(°)		
	传统理论算法	本文算法	传统采样算法
340~500	8.3	8.3	5.5
500~1 300	4.3	4.3	2.8
1 300~3 000	8	4.6	2.5
340~3 000	7.1	4.8	2.9

实验 2,测向环境与图 3 基本相同,接收环境良好,发射环境复杂。信源为 KeySight 8257,接收机为 Ceyear 3943B,测向频率为 340 MHz~3 GHz,发射功率 10 dbm,发射天线与测向天线距离 11 m、离地 2 m。测向天线为圆周 8 阵元、圆心 1 阵元的圆阵天线,发射天线为定向天线,信噪比与试验 1 接近。

表 3 真实工作环境测向结果

Table 3 Direction finding error of real work environment

频段/MHz	测向误差/(°)	
	本文算法	传统采样算法
340~500	7.3	9.5
500~1 300	5.0	7.3
1 300~3 000	4.8	3.7
340~3 000	5.4	6.2

为了验证传统采样算法对样本的依赖性,同时模拟测向任务中真实场景,实验 2 中传统采样算法使用的实验 1 中采集的样本库,测向频点为表 2 的非采样频点,根据实验结果得到表 3 数据。从测向结果整体分析,本文

使用的理论样本算法精度优于在非采样环境下使用非采样频点的传统采样算法。在基本相同的环境下(仅改变测向天线与发射天线距离,实验时间间隔 20 d),传统采样算法在非采样频点、非采样环境的测向误差比在采样环境下非采样频点高 3.3° ,比采样环境下采样频点高 4° 。由此可见,城市环境下获取适配性高的测向样本库难度较高。而本文使用的理论样本算法在 3 次结果分析中测向精度均处于 $4^\circ \sim 6^\circ$,性能稳定,且优于非采样环境下非采样频点的传统采样算法。这说明该算法能稳定应对环境变化对测向精度带来的影响,也可克服传统采样算法对环境的依赖性。

4 结 论

本文提出了基于相关峰的理论样本干涉仪测向算法,该算法在处理过程中与原有的相关干涉仪测向算法有两点不同:1)相关矩阵计算时使用理论样本,取代了开场采样的过程;2)相关系数计算后进行了局部峰值搜索、匹配,通过相关峰评价系数对局部峰值进行二次评价。外场实验和分析得到以下结论,本文算法在频段 340 MHz~3 GHz 的真实测向任务模拟过程中比相关干涉仪算法精度高 0.8° ;本文算法多次实验的总体精度相差未超过 1° ;本文算法能够减少测向环境、频率变化对测向精度的影响,消除传统采样算法对环境的依赖性;传统采样算法的测向精度对环境、样本敏感,细微变化会引入较大的误差。本文的算法也有一定的缺点,计算复杂度比传统采样算法高,根据平均统计,单次测向计算时间为传统采样算法的 3~4 倍。希望以后有学者可以找到比本文更具有代表性的特征值,降低计算复杂度,提高测向算法的实时性能。

参考文献

- [1] 张海,陈小龙,张涛,等.基于 MUSIC 算法的二次雷达应答信号分离方法[J].电子与信息学报,2020,42(12):2984-2991.
ZHANG H, CHEN X L, ZHANG T, et al. The secondary radar response signal separation method based on MUSIC algorithm[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2020, 42(12): 2984-2991.
- [2] 张楠,马超,许宝杰,等.基于 2D-MUSIC 算法 L 型声阵列的轴承故障研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(1):121-127.
ZHANG N, MA CH, XU B J, et al. Research on bearing fault based on 2D-MUSIC algorithm L-shaped acoustic array[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 121-127.
- [3] 李烁,马云飞,谢谨.基于 Wi-Fi 入射信号到达角超

分辨率估计的无源车速测量[J].仪器仪表学报,2020,41(10):268-276.

- LI SH, MA Y F, XIE J. Passive vehicle speed measurement based on super-resolution estimation of arrival angle of Wi-Fi incident signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 268-276.
- [4] 王方秋,张小飞,汪飞. IR-UWB 系统中基于 root-music 算法的 TOA 和 DOA 联合估计[J].通信学报,2014,35(2):137-145.
WANG F Q, ZHANG X F, WANG F. Root-music-based joint TOA and DOA estimation in IR-UWB[J]. Journal of Communication, 2014, 35(2): 137-145.
- [5] 何伟杰.基于无人机平台的无线电测向技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2020.
HE W J. Research on radio direction finding technology based on unmanned aerial vehicle platform[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [6] 冯永会,葛俊祥,李浩.无线测向定位算法及实现系统[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1602-1607.
FENG Y H, GE J X, LI H. Wireless orientation and location algorithm and its implementation system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(10): 1602-1607.
- [7] 袁伍威,华翔,雷斌.多移动监测站定位目标的研究[J].国外电子测量技术,2017,36(10):77-80.
YUAN W W, HUA X, LEI B. Research on target location of multi mobile monitoring station[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(10): 77-80.
- [8] 刘建华,彭应宁,田立生.基于方向向量空间距离的干涉仪测向处理方法[J].无线电工程,1999(1):14-15,19.
LIU J H, PENG Y N, TIAN L SH. Direction finding processing method of interferometer based on space distance of direction vector[J]. Radio Engineering of China, 1999(1): 14-15,19.
- [9] 李淳,廖桂生,李艳斌.改进的相关干涉仪测向处理方法[J].西安电子科技大学学报,2006,33(3):400-403.
LI CH, LIAO G SH, LI Y B. A DF method for the improved correlative interferometer[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(3): 400-403.
- [10] 杜政东,魏平.基线引导式快速相关干涉仪测向性能分析及提升方法[J].信号处理,2016,32(3):327-334.
DU ZH D, WEI P. Performance analysis and improved

- method of the fast correlative interferometer direction finder using guide baselines [J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(3): 327-334.
- [11] 王占刚, 王大鸣, 巴斌, 等. 基于高拉伸度遗传算法的相关干涉仪测向算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 39-44.
WANG ZH G, WANG D M, BA B, et al. Direction finding algorithm of correlated interferometer based on genetic algorithm with high degree of stretching [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(1): 39-44.
- [12] 谢树果, 郝旭春, 曾歆妍, 等. 一种基于相位差拟合的二次相关测向处理方法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 183-187.
XIE SH G, HAO X CH, ZENG X Y, et al. A secondary correlation method of direction finding based on phase differences interpolation algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(1): 183-187.
- [13] 刘宝平, 叶李超. 干涉仪测向中二维拟合算法研究[J]. 通信对抗, 2014(3): 31-34.
LIU B P, YE L CH. 2-D fitting algorithm research of DF method of correlation interferometer [J]. Communication Countermeasures, 2014(3): 31-34.
- [14] 雷云龙, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 基于小型无人机的相关干涉测向算法研究[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(3): 184-188.
LEI Y L, MEI J J, HU D P, et al. Research on correlation interferometer direction-finding algorithm based on small UAV [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2018, 32(3): 184-188.
- [15] 谢浩. 信号源测向与定位研究[D]. 桂林: 电子科技大学, 2017.
XIE H. Research on signal source orientation and location [D]. Guilin: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [16] 李彦龙, 杨博盛. 一种相关干涉仪与 MUSIC 算法相结合的改进测向算法[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(2): 42-44.
LI Y L, YANG B SH. A improved direction finding algorithm combined correlative interferometer and music algorithm [J]. Space Electronic Countermeasure, 2020, 36(2): 42-44.
- [17] 姚志成, 吴智慧, 杨剑, 等. 基于相关比幅测向的圆阵干涉仪解模糊算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(1): 33-39.
YAO ZH CH, WU ZH H, YANG J, et al. An ambiguity resolving algorithm by amplitude-comparison direction-finding for uniform circular array interferometer [J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(1): 33-39.
- [18] 杨明洋, 向长波. 相关干涉仪测向算法俯仰角误差分析[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 1-5.
YANG M Y, XIANG CH B. Elevation error analysis of correlative interferometer algorithm for direction finding [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(18): 1-5.
- [19] 赵地, 任晓飞. 相关干涉仪测向原始样本的求解方法[J]. 舰船电子对抗, 2012(18): 61-64, 97.
ZHAO D, REN X F. Solving method of original sample for correlation interferometer direction finding [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012(6): 61-64, 97.
- [20] 向长波, 杨明洋, 王锋. 一种基于滑动区间的单通道相关干涉仪测向方法及系统 [P]. 山东省: CN111679243A, 2020-09-18.
XIANG CH B, YANG M Y, WANG F. A direction finding method and system of single channel correlation interferometer based on sliding interval [P]. Shandong: CN111679243A, 2020-09-18.

作者简介



杨明洋, 2014 年于中国海洋大学获得学士学位, 2017 年于中国海洋大学获得硕士学位, 现为中国电子科技集团公司第四十一研究所工程师, 主要研究方向为波达方向估计。

E-mail: 148450721@qq.com

Yang Mingyang received his B. Sc. degree from Ocean University of China in 2014, M. Sc. degree from Ocean University of China in 2017. Now he is an engineer at 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interest includes direction of arrival estimation.