

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0020-04

一种改进的宽带相关干涉仪测向算法

马跃华^{1,2}, 郁文¹, 俞超¹, 杨革文^{1,2}

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 自动目标识别全国重点实验室(上海), 上海 201109)

摘要: 针对宽带相关干涉仪测角易出现角度模糊且精度有限的问题, 提出一种改进的宽带干涉仪测向算法。该方法首先利用先验信息限定谱峰搜索区域, 避免因噪声和失配导致的模糊谱峰误判, 从而提高初始角度估计的可靠性; 进而, 对检测到的谱峰进行凝聚处理, 通过局部加权平均计算其二维能量中心, 以此估计辐射源的方位角与俯仰角。该过程有效抑制了噪声与失配影响, 并突破了传统算法受样本角度间隔的约束, 可实现更高精度的角度估计。仿真结果表明, 所提算法在宽频带范围内能稳健应对信号与样本失配情况, 其测角精度显著优于传统方法, 为宽带干涉仪测向提供了更可靠的解决方案。

关键词: 相关干涉仪; 测向; 解模糊; 模型; 宽带干涉仪; 测向算法

中图分类号: TP18; TN957

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0020-04

An improved direction finding algorithm for wideband correlation interferometer

MA Yuehua^{1,2}, YU Wen¹, YU Chao¹, YANG Gewen^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201109, China;

2. National Key Laboratory of Automatic Target Recognition(Shanghai), Shanghai 201109, China)

Abstract: An improved broadband interferometer direction finding algorithm is proposed to address the issues of angle ambiguity and limited measurement accuracy in broadband correlation interferometry. The method first constrains the spectral peak search region using prior information to prevent misidentification of ambiguous peaks caused by noise and mismatch, thereby improving the reliability of initial angle estimation. Subsequently, spectral peak condensation is performed by calculating the two-dimensional energy center of the detected peak through local weighted averaging, which estimates the azimuth and elevation angles of the radiation source. This process effectively suppresses the effects of noise and mismatch, overcomes the constraint of fixed angular sampling intervals inherent in traditional algorithms, and enables higher-precision angle estimation. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm can robustly handle signal-to-sample mismatch across a wide frequency range, with significantly improved angle measurement accuracy over conventional methods, providing a more reliable solution for broadband interferometer-based direction finding.

Keywords: correlation interferometer; direction finding; ambiguity resolution; model; broadband correlation interferometer; direction finding algorithm

相关干涉仪是一种常用的测向技术, 通过测量空间信号在各通道间的相位差数据, 并与预先存储数据中的样本作相关运算, 搜索得到最相近的相位差数组, 从而索引得到来波方向^[1-3]。相关干涉仪测向具有测向精度高、算法简单、速度快等优点, 而且对天线的阵列结构要求较低, 可以抵抗一定的波前失真, 对极化误差也不敏感。相关干涉仪测向技术被广泛应用于通信定位、无线电频谱监测、电子对抗和安防等领域^[4-8]。

相关干涉仪天线阵列的长短基线导致了该算法在测向中存在基线镜像对称和相位模糊问题, 在进行最相关样本搜索时, 有一定概率得到错误的索引, 在对高频测向时尤其严重, 因为高频信号波长较短, 更容易出现相位模糊。

现有方法通常是进行相位差解模糊, 利用时间差信号或相位差变化规律, 将相位差恢复成无模糊值, 再求解信号角度的最终估计值^[9-15]。为解决相关干涉仪相位模糊引起的测向错误, 基于象限分类的改进算法, 通过对相位差进行象限分类来达到解模糊的测向结果^[9]。利用相位差构建复向量, 进一步与天线阵列流形拟合后避免相位差的整周跳变, 实现了干涉仪解模糊^[10]。基于卡尔曼滤波的相位模糊库处理方法, 对多径干扰下的相位模糊库进行优化, 达到有效测角的目的^[11]。现有这类方法可以有效解决基线镜像对称和相位模糊问题, 但是依赖相位差解模糊的正确性, 增加了算法的复杂度, 并且没有考虑角度、频率与样本库失配的影响。由于宽带干涉仪频率范围宽, 建库

收稿日期: 2024-11-02; 录用日期: 2024-12-15

作者简介: 马跃华(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 电子信息对抗、雷达系统设计、信号处理等。

引用本文: 马跃华, 郁文, 俞超, 等. 一种改进的宽带相关干涉仪测向算法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4): 20-23. (MA Yuehua, YU Wen, YU Chao, et al. An improved direction finding algorithm for wideband correlation interferometer[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(4): 20-23.)

的规模大,在对未知辐射源测向时经常出现实际空间信号频率、角度和样本库中样本不完全一致的情况,频率、角度和库中样本失配时,容易出现测向错误。

本文首先分析了相关干扰仪模型,提出一种区域限定的方法,避免搜索获得错误的角度值,进一步对搜索得到的最大值附近区域进行加权平均,提高测角精度,克服测角结果只能落在样本网格上的缺陷。

1 相关干涉仪模型

假设相关干涉仪的天线阵列是由 M 个阵元组成的二维面阵,第 1 个阵元位于原点,第 m 个阵元的坐标表示为 (x_m, y_m) ,有一远场辐射源,入射角度为 (θ, ϕ) ,其中 θ 为入射波在 XOY 平面上的投影与 X 轴的夹角, ϕ 为入射波与 XOY 平面的夹角,如图 1 所示。

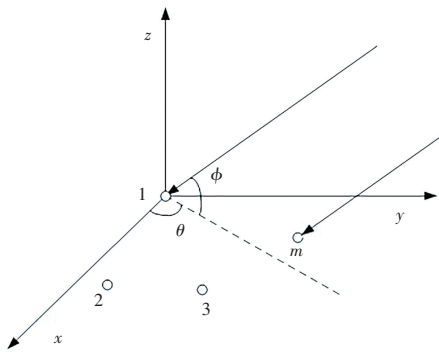


图 1 相关干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the correlation interferometer

根据几何关系可以推得,第 m 个阵元接收信号相对第 1 个阵元的时延 τ_m 如下表示为

$$\tau_m = (x_m \cos \theta \cos \phi + y_m \sin \theta \cos \phi) / c \quad (1)$$

式中, c 是电磁波传播速度。可以得到第 m 个阵元接收信号相对第 1 个阵元接收信号的相位差为

$$\varphi_m = 2\pi f(x_m \cos \theta \cos \phi + y_m \sin \theta \cos \phi) / c \quad (2)$$

式中, f 是信号频率。将 M 个相位差形成相位差复向量为

$$\mathbf{a} = [e^{j\varphi_1}, e^{j\varphi_2}, \dots, e^{j\varphi_M}] \quad (3)$$

对测得的相位差复向量 \mathbf{a} 和模板库里的频率 f 的相位差复向量 $\mathbf{b}(\theta, \varphi)$ 作相关,即

$$\rho(\theta, \varphi) = \frac{\mathbf{a}\mathbf{b}^H(\theta, \varphi)}{(\mathbf{a}\mathbf{a}^H)^{1/2}(\mathbf{b}\mathbf{b}^H)^{1/2}} \quad (4)$$

相关系数最大值相对应的样本值所代表的方位、俯仰角度,就是空间实际入射信号的方位角和俯仰角。

从相关干涉仪的测向原理可以看出,相关干涉仪的测向性能对样本库依赖性较强,对于样本库对应频率、角度之外的辐射源,测向结果往往会因为频率、角度失配而错误。而建立更细化的模板库需要耗费大量的人力、物力和时间。给定模板库情况下,对于宽带相关干涉仪测向算法存在如下两个方面的不足:

1) 高频时相关峰值容易出现模糊现象。高频时阵元间距比波长大得多,存在相位模糊现象,进一步利用相位差进行相关系数计算时会得到多个相关尖峰,难以区分峰

值是真实角度值还是模糊值。当实际频率、角度与模板库样本失配时带来的影响更加严重,因为频率角度失配时真实角度位置的相关值会有损失,在最大值搜索时往往会落在其他谱峰上,从而导致测角错误。

2) 低频时相关谱峰较宽,分辨率较低,谱峰顶部较为平坦,容易受相位噪声和频率失配影响,在谱峰上出现毛刺,导致最大值出现的点不一定在实际角度处,测角结果误差变大。

针对传统相关干涉仪算法存在的不足,提出一种改进的相关干涉仪算法,避免峰值模糊导致测角错误,提高测向稳健性和精度。

2 算法改进

2.1 基于先验信息的搜索区域限定

为了避免角度模糊,根据信号波长计算角度分辨率和无模糊角度范围,利用先验信息在无模糊范围内搜索相关最大值。对式(4)的相关系数在指定区域内搜索最大值,计算公式为

$$\begin{cases} \max \{ \rho(\theta, \phi) \} \\ \theta \in [\theta_0 - \Delta\theta, \theta_0 + \Delta\theta], \\ \phi \in [\phi_0 - \Delta\phi, \phi_0 + \Delta\phi] \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_0, ϕ_0 为方位角、俯仰角的先验角度信息,可以根据上一次测向结果获得或者外推滤波得到。 $\Delta\theta, \Delta\phi$ 分别为方位角和俯仰角相关谱峰无模糊角度范围,通常和干涉仪阵列天线的波束宽度有关,计算公式为

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{D_1} \quad (6)$$

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{D_2} \quad (7)$$

式中, D_1 和 D_2 分别为阵列天线在方位维和俯仰维的孔径大小。

2.2 基于谱峰凝聚的角度精细计算

为了提高谱峰凝聚的精度,避免噪声和失配对最大值搜索的影响,利用谱峰的中心对称特性,在谱峰周围一定范围内进行加权平均,获得谱峰的二维能量中心,对应的方位角和俯仰角即为辐射源的角度位置。

$$\hat{\theta} = \frac{\sum \rho(\theta, \phi) \theta}{\sum \rho(\theta, \phi)} \quad (8)$$

$$\hat{\phi} = \frac{\sum \rho(\theta, \phi) \phi}{\sum \rho(\theta, \phi)} \quad (9)$$

3 仿真分析

仿真时采用 6 阵元宽带均匀圆阵天线阵列,圆阵半径 60 mm,各阵元坐标分别为 $[30, 52], [-30, 52], [-60, 0], [-30, -52], [30, -52], [0, 60]$,单位为 mm。干涉仪通道之间相位差测量精度 10° 。样本库频率间隔 10 MHz,方位角和俯仰角间隔都是 1° 。

3.1 高频测向仿真

假设辐射源方位角 0.5° 、俯仰角 0.5° ，信号频率 15.01 GHz 。最临近样本的频率为 15 GHz 、方位角 0° 、俯仰角 0° 。辐射源实测相位差与频率为 15 GHz 的样本库中各角度相位差作相关后的相关图如图 2 所示。

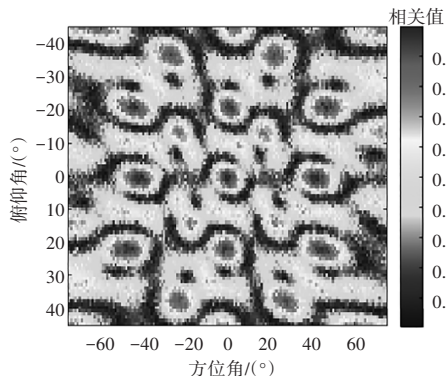


图 2 辐射源实测相位差与 15 GHz 样本库中各角度相位差作相关后的相关图

Fig. 2 Correlation map between measured and reference phase differences (15 GHz)

从图 2 中可以看出，除了在真实角度 ($0.5^\circ, 0.5^\circ$) 位置外，还有许多其他角度位置出现了较高的谱峰。这是由于阵列孔径相对信号波长大多，存在相位模糊引起的。这一现象引起的角度模糊在频率、角度失配时带来的影响更加严重，因为频率角度失配时真实角度位置的相关值会有损失，在最大值搜索时往往会落在其他谱峰上，从而导致测角错误。使用传统相关干涉仪算法和改进方法后的测角结果如图 3、4 和表 1 所示。

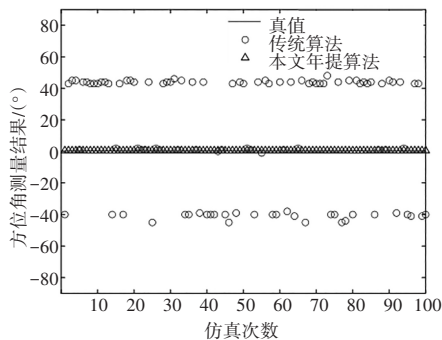


图 3 方位角测量结果 (15 GHz)

Fig. 3 Azimuth measurement results (15 GHz)

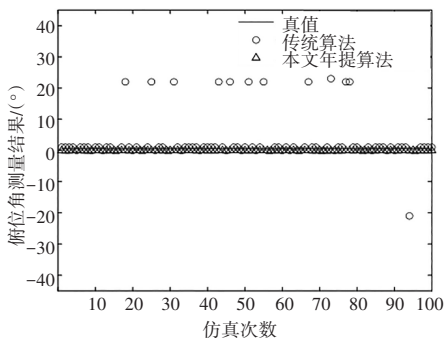


图 4 俯仰角测量结果 (15 GHz)

Fig. 4 Elevation angle measurement results (15 GHz)

表 1 传统相关干涉仪与本文改进方法测角结果对比 (频率 15 GHz)

Tab. 1 Comparison of angle measurement results between the conventional correlation interferometer and the proposed improved method (15 GHz)

算法	RMSE/($^\circ$)	
	方位角	俯仰角
传统算法	36.8	4.3
本文算法	0.6	0.19

根据仿真结果可以看出，传统相关干涉仪方法容易受到角度失配的影响，在最大值搜索时有一定概率落在错误谱峰上，从而得到错误的测角结果。本文所提算法限定搜索区域后可以克服模糊谱峰的影响，提高了测角算法的稳健性，从而得到了较高精度的测角结果。

3.2 低频测向仿真

假设辐射源方位角 0.5° 、俯仰角 0.5° ，信号频率 4.01 GHz 。最临近样本的频率为 4 GHz 、方位角 0° 、俯仰角 0° 。辐射源实测相位差与频率为 4 GHz 的样本库中各角度相位差作相关后的相关图如图 5 所示。

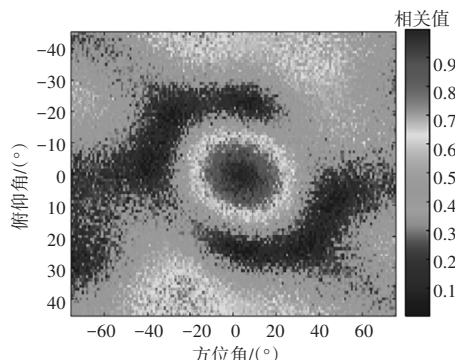


图 5 辐射源实测相位差与 4 GHz 样本库中各角度相位差作相关后的相关图

Fig. 5 Correlation map between measured and reference phase differences (4 GHz)

从上图可以看出，频率较低时相关谱峰较宽，这是因为低频时波长较长阵列天线的波束较宽。角度、频率失配时虽然不会像高频一样因谱峰模糊出现模糊值，但是由于噪声的影响，导致尖峰较平坦或有毛刺，测角结果误差会变大。使用传统相关干涉仪算法和改进方法后的测角结果如图 6 和表 2 所示。

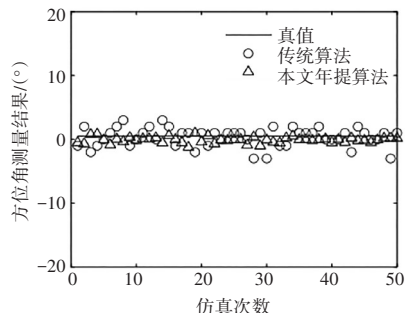


图 6 方位角测量结果 (4 GHz)

Fig. 6 Azimuth measurement results (4 GHz)

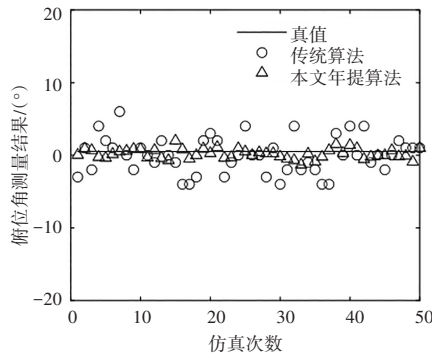


图 7 俯仰角测量结果 (4 GHz)

Fig. 7 Elevation angle measurement results (4 GHz)

表 2 传统相关干涉仪与本文改进方法测角结果对比 (频率 4 GHz)

Tab. 2 Comparison of angle measurement results between the conventional correlation interferometer and the proposed improved method (4 GHz)

算法	RMSE/(°)	
	方位角	俯仰角
传统算法	2.52	0.74
本文所提算法	1.47	0.77

从仿真结果可以看出,传统算法和本文所提算法得到的结果都在真实值附近波动,没有出现明显的错误值。由于所提算法对谱峰中心进行了凝聚,获得的测角结果更高。另外,传统算法在搜索最大值时受样本角度间隔影响,以上述仿真为例,传统算法样本匹配后最理想的角度值只能是 0°或 1°,而无法得到 0.5°这个样本库中没有的角度值。所提算法凝聚后得到角度值不受样本角度间隔限制,进一步提高了测角精度。

4 结论

本文提出了一种改进的宽带相关干涉仪测角算法,首先利用区域限定避免搜索获得错误的角度值,进一步对搜索得到的最大值附近区域进行谱峰凝聚。仿真结果表明所提算法可以有效克服空间信号频率、角度和样本库中样

本失配的情况,在低频和高频测向时都表现出了良好的稳健性和较高测角精度。

参考文献

- [1] WEI H W, SHI Y G. Performance analysis and comparison of correlative interferometers for direction finding[C]//2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2010: 393-396.
- [2] PARK C, KIM D. The fast correlative interferometer direction finder using I/Q demodulator[C]//2006 Asia-Pacific Conference on Communications. Busan: IEEE, 2006: 1-5.
- [3] KEBELI M. Extended symmetrical aperture direction finding using correlative interferometer method[C]// 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). Bursa: IEEE, 2011: II-209-II-213.
- [4] 张文旭, 吴振南, 陆满君, 等. 电子侦察干扰一体机及国产化综述[J]. 空天防御, 2022, 5(2): 75-86.
- [5] 高婕, 牛刚, 杜太行, 等. 超短波多径信号相关干涉仪测向算法[J]. 兵工学报, 2020, 41(11): 2252-2259.
- [6] 苏筱婷, 李奇, 唐成师, 等. 基于多源数据融合的制导控制系统评估方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(12): 35-39.
- [7] 贾亦珍, 周丽卿, 杨睿, 等. 一种含分布式电源的配电网网损分配算法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8): 73-77.
- [8] 田建林, 陈晓波, 张文昌, 等. 移动机器人自主导航技术研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7): 1-4, 55.
- [9] 蔡立萍, 胡家良, 陈海华, 等. 改进相关干涉仪算法在 DOA 估计中的应用[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(12): 129-135.
- [10] 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.
- [11] 李瑞霖, 赵文鹏, 张书哲, 等. 一种基于卡尔曼滤波的相关干涉仪改进算法[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2022, 37(2): 14-19.
- [12] 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.
- [13] 杜政东, 魏平, 尹文禄, 等. 一种快速二维相关干涉仪测向算法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1176-1182.
- [14] LEE J H, WOO J M. Interferometer direction-finding system with improved df accuracy using two different array configurations[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14): 719-722.
- [15] QIN L, JIA K, HE Z. Performance analysis of correlative interferometer direction finder using cosine function[C]//2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.