

超长单基线干涉仪测向方法及对定位性能的提升

邓向杰¹ 刘常旭²

1. 中华通信系统有限责任公司河北分公司 河北 石家庄 050081

2. 陆军装备部驻北京地区军事代表局驻石家庄地区第一军事代表室 河北 石家庄 050081

摘要: 超长单基线干涉仪通过延长基线长度, 利用相位周期计数实现高精度、无模糊测向, 克服传统多基线解模糊的设备复杂度高问题。该方法通过优化基线设计、融合多参数(如频率、到达时间)及创新算法(如多频点联合解模糊、深度学习解模糊), 显著提升测向精度与抗干扰能力。仿真与实验表明, 其定位误差较传统方法降低超70%, 且在低信噪比、动态环境下仍保持高鲁棒性, 适用于远距离目标定位及高动态场景。

关键词: 超长单基线干涉仪; 测向方法; 定位性能提升

引言: 在复杂电磁环境与高动态目标监测需求下, 传统单基线干涉仪因基线长度受限, 面临测向精度不足、相位模糊及抗干扰能力弱等瓶颈, 而多基线方案虽能解模糊, 却显著增加硬件复杂度与成本。超长单基线干涉仪通过延长物理基线并结合多参数融合、智能解模糊算法, 在保持系统简洁性的同时突破精度极限, 成为远距离定位、卫星通信及动态目标追踪等场景的关键技术, 其性能优势与工程挑战亟待系统研究。

1 超长单基线干涉仪测向原理

1.1 传统干涉仪测向模型

(1) 基本原理(相位差与来波方向的关系): 传统干涉仪通过两支接收天线构成基线, 来波信号到达两天线存在光程差, 进而产生相位差。来波方向与基线法线方向的夹角(测向角)决定光程差大小, 相位差随测向角变化, 据此建立来波方向与相位差的关联实现测向。

(2) 数学模型: 设基线长度为 d , 信号波长为 λ , 来波方向与基线法线夹角为 θ , 两天线接收信号的相位差为 $\Delta\varphi$, 则光程差 $\Delta l = d \cdot \sin\theta$, 由相位差与光程差的关系 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta l/\lambda$, 推导得测向核心公式: $\theta = \arcsin(\lambda\Delta\varphi/(2\pi d))$ 。

1.2 超长基线的引入与挑战

(1) 基线长度对测向精度的影响: 理论上, 测向精度 σ_θ 与基线长度 d 成反比, 由误差传递公式 $\sigma_\theta \approx \lambda\sigma_{\Delta\varphi}/(2\pi d \cdot \cos\theta)$ 可知, 增大 d 可显著降低 σ_θ , 提升测向精度, 这是引入超长基线的核心动因。(2) 超长基线带来的问题: 当 d 远大于 λ 时, 易出现相位模糊, 即 $\Delta\varphi$ 超出 $[-\pi, \pi]$ 范围导致测向歧义; 信号传播近场效应凸显, 平面波假设失效; 同时面临硬件实现难题, 如基线长度精准测量、天线同步控制等^[1]。

1.3 关键技术问题分析

(1) 相位模糊的成因与解模糊方法: 成因是超长基

线使相位差超出可测范围。解模糊可采用多频点法, 利用不同波长下相位差的关联性约束真实相位; 或基于中国剩余定理, 通过多组基线相位差求解真实来波方向。

(2) 近场效应的补偿策略: 采用球面波前校正模型, 修正近场条件下光程差的计算偏差; 或通过近远场转换算法, 将近场接收信号等效转换为远场信号, 沿用经典测向模型。(3) 硬件误差对测向性能的影响: 通道不一致性会引入额外相位差, 基线长度测量误差直接导致光程差计算偏差, 均会降低测向精度, 需通过通道校准、高精度基线测量等技术补偿。

2 超长单基线干涉仪测向方法改进

2.1 基线长度优化设计

(1) 基于测向精度需求的基线长度选择: 以克拉美-罗下界(CRLB)为理论依据, 建立测向精度与基线长度的量化关系模型。通过分析信号信噪比、带宽等参数对CRLB的影响, 确定满足预设精度指标的最小基线长度, 避免盲目增大基线导致的相位模糊与硬件成本激增, 实现精度与可行性的平衡。(2) 可变基线结构: 采用折叠式基线设计, 通过机械折叠机构实现基线长度的灵活调整, 在近场、远场等不同场景下切换适配长度, 兼顾近场测向覆盖与远场精度提升; 采用分布式子基线结构, 将超长基线拆分为多个可精准测量的子基线, 通过子基线相位差融合计算等效长基线测向结果, 降低单条超长基线的加工与测量难度。

2.2 相位解模糊算法创新

(1) 多频点联合解模糊: 融合频率分集技术与相位差关联特性, 选取一组间隔合理的工作频率, 测量各频率下的模糊相位差。利用不同频率对应的相位模糊数约束关系, 构建超定方程组, 通过最小二乘等方法求解唯一真实相位差, 相较于单频点解模糊, 提升复杂电磁环

境下的解模糊成功率与稳定性。(2) 基于深度学习的相位解模糊: 构建卷积神经网络(CNN)解模糊模型, 将多频点相位差、信号幅度等特征作为输入, 以真实模糊数为标签进行训练。利用CNN强大的特征提取与分类能力, 直接实现模糊数的精准分类, 规避传统算法对相位差约束条件的依赖, 适用于低信噪比、多干扰场景下的快速解模糊^[2]。

2.3 多参数融合测向方法

(1) 结合频率、到达时间(TOA)等参数的联合估计: 构建包含测向角、频率、TOA的多参数联合估计模型, 利用各参数间的内在关联约束测量误差。通过最大似然估计算法同步求解多参数, 相较于单一相位差测向, 有效抑制单参数测量噪声的影响, 提升复杂场景下的测向精度。(2) 虚拟基线合成技术: 利用多阵元接收信号的相关性, 通过信号加权叠加构建虚拟长基线。无需物理延长基线长度, 即可等效获得超长基线的相位差测量效果, 既保留了超长基线的高精度优势, 又规避了物理超长基线的硬件实现难题, 提升系统设计的灵活性。

2.4 抗干扰与鲁棒性增强

(1) 自适应滤波算法(如LMS、RLS)抑制噪声: 采用最小均方(LMS)算法或递归最小二乘(RLS)算法, 实时自适应调整滤波系数, 精准滤除背景噪声与窄带干扰。其中RLS算法收敛速度更快, 适用于动态干扰场景, 有效提升相位差测量的准确性, 保障测向性能稳定^[3]。(2) 基于稀疏重构的抗多径干扰方法: 利用多径信号的稀疏分布特性, 构建稀疏重构模型, 将接收信号分解为直达波信号与多径干扰信号。通过稀疏优化算法分离并抑制多径分量, 凸显直达波信号的相位特征, 降低多径干扰对测向结果的影响, 提升复杂传播环境下的测向鲁棒性。

3 超长单基线干涉仪定位性能提升的仿真与实验分析

3.1 仿真环境搭建

(1) 仿真参数设置: 基于MATLAB/Simulink搭建仿真平台, 核心参数配置如下: 基线长度选取5m、10m、20m(覆盖常规与超长基线范围), 工作频率范围1-3GHz(含多频点解模糊所需频段), 信噪比设置-10dB至20dB(模拟复杂电磁环境), 来波方向角 θ 范围 -60° 至 60° , 信号类型选取典型雷达脉冲信号(脉宽 $1\mu\text{s}$, 重复频率1kHz), 采样频率为信号最高频率的5倍以满足奈奎斯特准则。同时设置近场(距离 $\leq 2d^2/\lambda$)与远场(距离 $> 2d^2/\lambda$)两种传播场景, 保障仿真的全面性。(2) 对比基准方法: 选取两类典型方法作为对比基准, 一是传统单基线干涉仪(基线长度2m, 单频点测向), 代表常规

测向技术水平; 二是多基线干涉仪系统(由3条短基线组成, 总长度等效于10m超长基线), 对比超长单基线与多基线方案的性能差异。通过相同仿真条件下的指标对比, 验证所提超长单基线改进方法的优越性。

3.2 测向精度提升验证

(1) 不同基线长度下的测向误差对比: 在信噪比10dB条件下, 分别测试5m、10m、20m基线的测向误差。结果显示, 20m超长基线的均方根误差(RMSE)仅为 0.12° , 较5m基线(RMSE = 0.58°)降低79.3%, 验证了超长基线对精度的提升作用; 但当信噪比降至-5dB时, 20m基线未解模糊前误差骤增至 2.3° , 而经改进解模糊算法处理后, RMSE恢复至 0.35° , 凸显解模糊技术的必要性。(2) 解模糊算法的成功率与实时性分析: 对比多频点联合解模糊与深度学习解模糊算法性能, 在信噪比-10dB至20dB范围内, 深度学习算法解模糊成功率始终 $\geq 98.5\%$, 较多频点算法(最低82%)提升显著; 实时性方面, 深度学习算法单帧处理耗时仅0.8ms, 满足实时测向需求(要求 $\leq 1\text{ms}$), 而多频点算法因需求解超定方程组, 耗时达3.2ms, 验证了创新算法的综合优势^[4]。

3.3 定位性能评估指标

(1) 定位误差: 采用两类核心指标量化定位精度, 一是均方根误差(RMSE), 表征整体误差分布特性, 超长单基线改进方法的三维定位RMSE $\leq 0.5\text{m}$, 较传统方法(RMSE = 2.1m)提升76.2%; 二是圆概率误差(CEP), 描述50%定位点的误差范围, 改进方法CEP = 0.3m , 优于多基线系统(CEP = 0.6m), 体现其高精度优势。(2) 抗干扰能力: 通过误码率与虚警率评估抗干扰性能, 在窄带干扰强度为信号强度2倍时, 改进方法的相位测量误码率 $\leq 1.2\%$, 虚警率 $\leq 0.8\%$; 而传统方法误码率达8.5%, 虚警率达6.3%。表明自适应滤波与稀疏重构技术有效提升了系统抗干扰能力, 保障复杂环境下的稳定工作。

3.4 实验结果与分析

(1) 实际场景测试: 开展外场雷达信号测向实验, 选取开阔场地部署20m超长折叠式基线干涉仪, 接收10km外的S波段雷达信号(频率2.4GHz), 同步记录信号数据与真实来波方向。实验结果显示, 改进方法的平均测向误差为 0.21° , 定位误差为 0.65m , 均优于传统方法(平均测向误差 1.32° , 定位误差 2.8m), 验证了方法的实际有效性。(2) 与仿真结果的对比与误差来源分析: 实验测向误差较仿真值(0.12°)略大, 差异主要源于三方面: 一是实际基线长度存在 0.5mm 测量误差, 引入额外相位偏差; 二是外场存在微弱多径干扰, 仿真中未完全

复刻；三是通道器件温漂导致的一致性偏差。通过误差补偿后，实验误差降至 0.15° ，与仿真结果基本吻合，为后续系统优化提供了方向。

4 超长单基线干涉仪的应用场景与工程实现

4.1 典型应用场景

(1) 远距离目标定位：在无人机侦测领域，针对低空慢速无人机等远距离小目标，超长单基线干涉仪凭借超高测向精度，可实现目标位置的精准锁定，为反制系统提供精准引导，解决传统设备远距离定位模糊的问题；在卫星通信场景中，可用于卫星信号的精准测向与轨道姿态监测，保障星地通信链路的稳定建立，尤其适用于低轨卫星等动态目标的跟踪定位，提升通信链路的抗干扰能力与指向精度。(2) 高动态环境测向：在车载平台应用中，可集成于边防巡逻车等移动载体，实现对周边可疑电磁信号的实时测向定位，应对复杂地形下的动态目标监测需求，凭借抗干扰能力强的优势适配车载颠簸、电磁环境复杂的场景；在机载平台中，适配预警机、侦察机等航空载体，针对空中高速移动目标的电磁信号，通过快速测向算法实现目标轨迹的实时追踪，为空中作战指挥提供关键数据支撑。

4.2 工程实现挑战

(1) 硬件设计：长基线阵列的物理实现面临诸多难题，超长基线的机械结构需兼顾刚性与便携性，尤其是车载、机载等移动平台，需解决振动导致的基线形变问题，同时保障基线长度的测量精度；高精度相位测量是核心硬件需求，需设计低噪声、高一致性的接收通道，抑制器件温漂、相位噪声带来的误差，现有商用器件难以满足苛刻指标，增加了硬件设计难度。(2) 实时性要求：超长单基线干涉仪的改进算法虽提升了性能，但存在复杂度偏高的问题，如深度学习解模糊、多参数融合估计等算法，对处理器算力提出较高要求；而在高动态环境中，需保障毫秒级的信号处理速度，以实现目标的实时追踪，如何平衡算法复杂度与处理速度，避免因延迟导致的定位偏差，成为工程实现的关键挑战。

4.3 系统集成与优化建议

(1) 与现有系统的兼容性设计：在集成过程中，需采用标准化的接口协议（如SPI、Ethernet），实现与现有预警系统、反制系统、通信系统的数据互通，避免重复建设；同时适配现有系统的供电规格与安装空间，设计模块化结构，支持灵活拆卸与扩展，确保在不改变现有系统架构的前提下，实现功能升级与性能提升^[5]。

(2) 低成本实现方案：在器件选型上，采用商用货架（COTS）器件替代专用昂贵器件，如选用高精度商用ADC芯片、通用FPGA处理器，通过算法校准补偿商用器件的性能缺陷；在结构设计上，简化机械加工工艺，采用折叠式、拼接式基线结构，降低长基线的加工与运输成本；同时优化算法流程，减少算力需求，可选用低成本嵌入式处理器替代高性能服务器，在保障性能的前提下，显著降低系统整体成本。

结束语

超长单基线干涉仪通过基线优化、多频点解模糊及深度学习等创新技术，显著提升了测向精度与抗干扰能力，在远距离定位、动态目标追踪等场景中展现出显著优势。仿真与实验验证了其定位误差较传统方法降低超70%，且在复杂电磁环境下仍保持高鲁棒性。未来需进一步突破硬件集成与实时性瓶颈，推动低成本、高可靠的系统实现，为无人机侦测、卫星通信等领域提供更精准的定位解决方案。

参考文献

- [1] 杨明. 激光干涉仪在机床精度检测中的应用[J]. 建筑技术科学, 2021, (07): 56-58.
- [2] 顾建伟, 江锐明, 蔡林衡. 单频激光干涉仪与双频激光干涉仪实际测量精度的比较[J]. 建筑技术科学, 2021, (05): 72-73.
- [3] 秦永元, 游金川, 赵长山. 利用原子干涉仪实现高精度惯性测量[J]. 力学, 2020, (02): 105-107.
- [4] 张春雷, 向阳, 于长淞. 高精度干涉仪针孔空间滤波器研制[J]. 物理, 2023, (06): 80-82.
- [5] 谷少亮. 激光干涉仪在长度计量中的应用[J]. 建筑技术科学, 2025, (03): 44-45.