

基于微波光子的高精度毫米波测向技术

唐龙^{1,2,3}(1.桂林长海发展有限责任公司,广西 桂林 541001;2.华东交通大学 信息工程学院,南昌 330013;
3.广西智能电磁频谱感知与控制技术工程研究中心,广西 桂林 541001)

摘要:针对传统毫米波测向技术存在传输损耗大、幅相一致性差及抗干扰能力弱等问题,提出一种基于微波光子的高精度毫米波测向技术。该技术结合并联马赫-曾德尔调制器(MZM)相干光子变频技术与多基线干涉仪测向算法,通过光域信号处理实现毫米波信号的低损耗传输与高保真变频;采用多通道阵列天线方向图校正方法补偿系统幅相误差,并利用逼近交互式多模型(IMM)测向滤波算法剔除测向异常值。仿真与实测表明:该技术将测向数据波动范围从 $27.2^{\circ}\sim 32.5^{\circ}$ 收敛至 $29.7^{\circ}\sim 30.2^{\circ}$,测向均方误差最大值为 0.31° ,显著优于传统微波测向方法。

关键词:微波光子;毫米波干涉仪;交互式多模型;一致性校正

中图分类号:TN91 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0101-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High-precision millimeter-wave direction finding technology based on microwave photonics

TANG Long^{1,2,3}

(1. Guilin Changhai Development Co., Ltd., Guilin Guangxi 541001, China;

2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Guangxi Intelligent Electromagnetic Spectrum Sensing and Control Technology Engineering Research Center, Guilin Guangxi 541001, China)

Abstract: In response to issues such as high transmission loss, poor amplitude-phase consistency, and weak anti-interference capability in traditional millimeter-wave direction-finding technologies, a high-precision millimeter-wave direction-finding technique based on microwave photonics is proposed. This technology integrates parallel Mach-Zehnder modulator (MZM) coherent photonic frequency conversion with multi-baseline interferometric direction finding algorithms, achieving low-loss transmission and high-fidelity frequency conversion of millimeter-wave signals through optical-domain signal processing. A multi-channel array antenna pattern calibration method is employed to compensate for system amplitude-phase errors, while an approximate interacting multiple model (IMM) direction finding filtering algorithm is utilized to eliminate abnormal direction finding values. Simulations and experimental results demonstrate that this technology reduces the direction finding fluctuation range from $27.2^{\circ}\sim 32.5^{\circ}$ to $29.7^{\circ}\sim 30.2^{\circ}$, with a maximum mean square error of 0.31° , significantly outperforming conventional microwave direction finding methods.

Key words: microwave photonics, millimeter wave interferometer, interacting multiple model, consistency correction

0 引言

现代战争对火力打击的高精度要求,正在推动传

收稿日期:2024-11-19。

作者简介:唐龙(1984—),男,高级工程师,主要研究方向为无线电信号定位、系统总体技术和微波光子融合应用。主持或参与完成多项国家级、省部级科研项目。



统弹药武器向智能化和精确化方向发展,促进了各类先进制导方式的精确火力打击武器系统的广泛应用。从历次高技术局部战争来看,典型作战模式主要包含多维立体侦察态势感知、电磁自适应干扰压制和先导精确火力打击3个关键环节,其中先导精确火力打击贯穿战争全过程。特别是在俄乌冲突中,交战双方在陆战中大量使用了战术导弹、制导导弹等多种制导弹药,其中毫米波制导的精确制导弹药在对重要军事目标实施精确打击方面表现尤为突出。在此背景下,快

唐龙: 基于微波光子的高精度毫米波测向技术

速、高精度地测定毫米波雷达目标信号辐射源方向,对于侦察定位、信号处理、电磁干扰引导及火力打击等军事行动具有至关重要的战略意义^[1]。

传统毫米波信号辐射源测向方法主要包括比幅测向法、阵列波束合成法和综合孔径法。这些方法各有其局限性:比幅测向法需增加波束数量和缩窄波束宽度^[2]才能提高测向精度;阵列波束合成法需对多个阵列天线阵元进行变频采样,通过波束合成实现高精度测向,但实时性较差^[3];综合孔径法则需结合辐射源空域稀疏特性建立压缩感知模型进行信号重构来实现无源测向,但对未知噪声分布和辐射源稀疏程度的适应性较弱^[4]。针对这些局限性,本文提出一种基于微波光子的高精度毫米波测向技术。

1 基于微波光子的高精度毫米波测向技术

本文提出的基于微波光子的高精度毫米波测向技术的核心在于将并联马赫-曾德尔调制器(MZM)的相干光子变频技术与多基线相位干涉仪测向技术相结合,从而解决传统毫米波测向技术的瓶颈问题。

1.1 基于并联 MZM 的相干光子变频技术

微波光子变频技术通过将光子变频处理、微波信号稳定传输与光子通信宽带特性相结合,充分发挥光波信号和微波信号的技术优势。该技术利用光子通信的传输损耗低、抗干扰能力强和幅相稳定性高等特点,将宽带微波信号转换为窄带光波信号,通过光纤介质进行长距离传输并在光域直接完成频率转换,克服传统微波技术中毫米波经电缆介质长距离传输损耗大和多次变频幅相一致性控制难的局限性^[5-6]。基于并联 MZM 的相干光子变频链路采用四波混频技术实现调制光本振信号的谐波增强,将射频信号和本振信号全部转换到光域进行处理,从而实现了宽频范围、灵活可调的毫米波下变频^[7-8]。该链路主要由半导体激光器、光分路器、MZM、光电探测器和电滤波器组成,

组成原理框图如图 1 所示。

基于并联 MZM 的相干光子变频技术采用光域处理方法实现毫米波信号的相干变频。具体工作流程为:激光器产生的光载波信号经光分路器分为 2 路,分别输入 2 个 MZM。其中, MZM₁ 将输入的毫米波信号调制到光载波上, MZM₂ 则将微波本振信号调制到另一路光载波上,经光放大器放大后, 2 路光信号在光域进行混频耦合,耦合后的光信号通过长距离光纤传输至光电探测器完成光/电转换,最终由电滤波器输出下变频后的中频信号,实现毫米波信号的相干光子变频。

1.2 多基线相位干涉仪测向技术

1.2.1 硬件架构

为获得理想的测向精度,多基线相位干涉仪测向技术设备采用毫米波平面螺旋天线作为接收天线阵元,该天线具有宽频带特性、稳定的相位中心和圆极化性能^[9],在宽频带范围内能保持阻抗和方向性能的稳定性,适合接收大空域和宽频域的毫米波目标信号。接收到的毫米波信号经微波光子变频模块下变频为中频信号后,输入测频测向一体化模块进行信号采样和处理,最终实现宽空域大带宽毫米波信号的高精度测向。

测向设备组成框图如图 2 所示。该设备主要由接收天线阵列、微波光子变频模块和测频测向一体化模块组成。系统基于多通道并行处理架构,通过微波光子技术实现毫米波信号的高精度测向。系统工作时,首先通过接收天线阵列(天线 1~天线 5)捕获空间目标信号。信号经单刀双掷开关选择分配后,进入 5 个独立的相干光子变频通道进行处理^[10]。每个变频通道均包含放大滤波单元,并采用校正信号(校正信号 1~校正信号 5)进行实时幅相校准,同时通过光载波(光载波 1~光载波 5)完成信号下变频。微波光子变频模块采用可变光学本振组合和光分路器技术,最终输出 5 路稳定的中频信号至测频测向一体化模块^[11]。测频

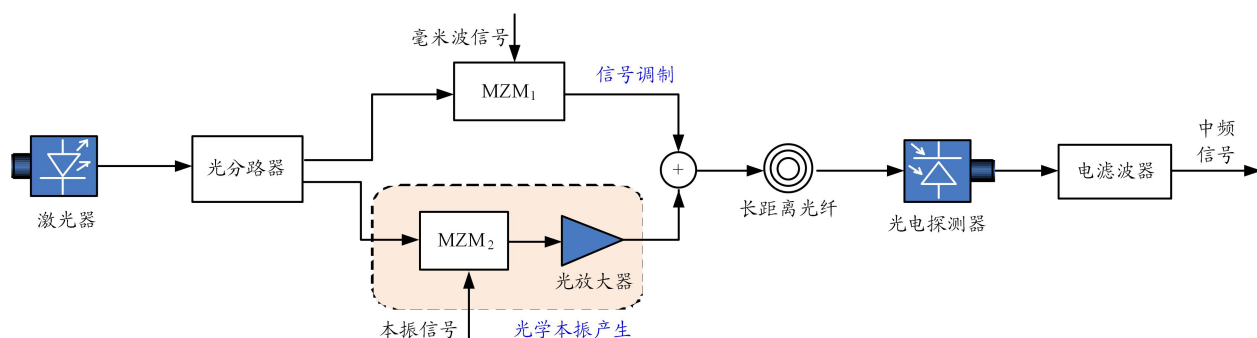


图 1 基于并联 MZM 的相干光子变频原理框图

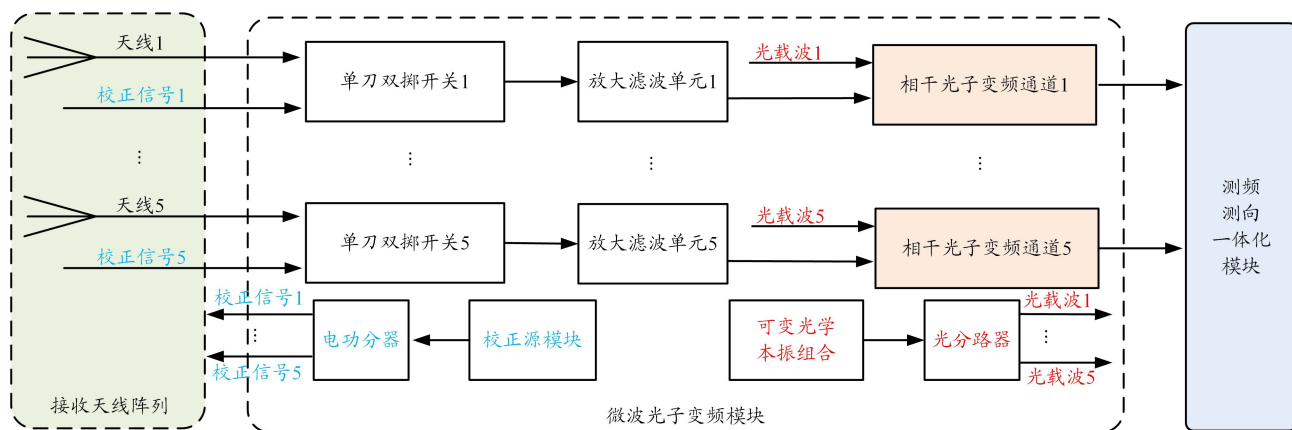


图2 测向设备组成框图

测向一体化模块采用多通道并行接收技术,同步完成信号采集、脉冲参数测量等操作,并基于多基线干涉仪算法实现高精度测向。系统最终输出包含完整脉冲特征的全脉冲描述字(PDW)信号流,供后端处理单元进行测向结果的优化滤波和信号分选处理。这种模块化设计确保了从信号接收到数据处理全链路的高性能测向能力。

1.2.2 测向算法

多基线相位干涉仪测向算法通过合理配置多组基线来实现高精度测向,其核心原理是利用长基线提高测向精度^[12],同时通过多基线组合解决相位模糊问题。针对毫米波信号波长短的特点,本文在兼顾天线物理尺寸和测向性能的前提下,采用基于5天线四基线构型的相位干涉仪设计,其系统框图如图3所示。该设计通过优化基线长度比例关系,在有限空间约束下实现了毫米波信号的高精度测向,有效平衡了测向精度与解模糊能力的技术要求。算法具体步骤如下:

首先,构建5天线四基线毫米波干涉仪,四基线长度设置必须满足一定的比例关系($\frac{d_1}{d_2} = \frac{p}{q}$ 、 $\frac{d_1}{d_3} = \frac{m}{n}$ 、 $\frac{d_1}{d_4} = \frac{r}{s}$,其中 p, q, m, n, r, s 互为质数),进一步得到对应四基线毫米波的相位差为

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \sin \theta = \Delta \phi_1 + 2k_1 \pi \\ \phi_2 = \frac{2\pi d_2}{\lambda} \sin \theta = \Delta \phi_2 + 2k_2 \pi \\ \phi_3 = \frac{2\pi d_3}{\lambda} \sin \theta = \Delta \phi_3 + 2k_3 \pi \\ \phi_4 = \frac{2\pi d_4}{\lambda} \sin \theta = \Delta \phi_4 + 2k_4 \pi \end{cases} \quad (1)$$

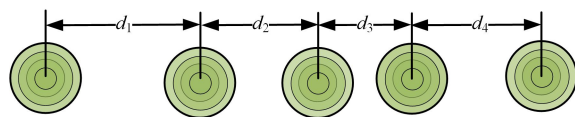


图3 5天线四基线毫米波干涉仪组成框图

其中, d_1, d_2, d_3, d_4 为毫米波干涉仪的4组基线长度, $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 为4组基线对应的理论相位差, $\Delta \phi_1, \Delta \phi_2, \Delta \phi_3, \Delta \phi_4$ 为4组基线对应的实测相位差, k_1, k_2, k_3, k_4 为4组基线对应的相位差模糊数, θ 为目标信号到达角, λ 为目标信号波长。

然后,通过虚拟参差解相位差模糊算法,对模糊数 k_1, k_2, k_3, k_4 进行解模糊计算;

最后,根据目标信号到达角计算公式,可以获得四基线毫米波干涉仪的到达角值为

$$\theta = \arcsin \left[\frac{\lambda(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4)}{2\pi(d_1 + d_2 + d_3 + d_4)} \right] \quad (2)$$

2 测向精度提升方法

2.1 多通道天线方向图测试及校正

传统天线阵列方向图的测量通常依赖微波暗室,但受限于电子战装备的体积和暗室空间,大型设备往往难以进行完整测试。这种测试方式无法真实反映实际使用中天线互耦、天线罩透波性及平台信号反射等因素对方向图的影响,导致装备性能评估存在偏差。本文提出一种多通道阵列天线方向图测试及校正方法。该方法利用装备自身的接收天线阵列、微波光子变频模块和测频测向一体化模块等硬件资源,构建了一套完整的在役测试系统。当系统工作时,首先通过优化配置的多通道接收天线阵列采集空域无线电信号,各阵元接收的信号经相干光子变频通道下转为中频信号后,由测频测向模块实时测量幅度和相位参

唐龙: 基于微波光子的高精度毫米波测向技术

数, 形成 PDW 全脉冲描述字并上传至显控计算机进行方向图绘制。该方法的核心在于采用内置校正源模块与自适应算法相结合的方式实现系统级校正。具体实施流程及误差分析如下:

- 1) 采用按特定基线长度或固定夹角排布的多通道接收天线阵列, 实现对覆盖空域内无线电信号的接收;
- 2) 对接收到的信号进行幅度/相位测量;
- 3) 利用内置校正源对信号幅度/相位进行接收通道的幅度/相位一致性校正, 减少设备接收通道幅度/相位一致性对多通道阵列天线方向图测试的影响;
- 4) 对多通道阵列天线进行幅度/相位方向图测试, 形成包含多个天线阵元的幅度/相位值的全脉冲描述字;
- 5) 对包含多个天线阵元的幅度/相位值的全脉冲描述字进行数据处理, 生成多个天线阵元独立的幅度/相位数据文件;

6) 根据多个天线阵元独立的幅度/相位数据文件, 生成相应的天线阵元幅度/相位方向图。同时计算出多个天线阵元独立的幅度/相位数据差异, 对应生成相应的天线阵元间幅度/相位一致性校正数据。

多基线相位干涉仪测向误差公式为

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi d \cos\theta} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \tan\theta \quad (3)$$

其中, d 为天线阵元间基线长度, $\Delta\varphi$ 为测试相位差误差, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 为频率测试误差值。

测试相位差误差 $\Delta\varphi$ 和基线长度 d 是影响干涉仪测向误差的 2 个主要因素。一旦基线长度确定, 通常保持不变, 因此在分析时主要考虑测试相位差误差的影响。测试相位差误差主要由毫米波天线阵元间相位一致性差异、相干光子变频通道间失衡差异、模/数转换器(ADC)量化差异和噪声差异组成。在工程实现中, 通过控制天线间的校正后相位一致性差异 σ_a 不超过 12° , 失衡差异 σ_u^2 不超过 3° , 量化差异 σ_q 不超过 1° , 噪声差异 σ_n 不超过 3° , 可以计算出设备的最大相位差误差为

$$\Delta\varphi_{\max} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_u^2 + \sigma_q^2 + \sigma_n^2} = \sqrt{12^2 + 3^2 + 1^2 + 3^2} = 12.7^\circ \quad (4)$$

在工程实现上考虑保留一部分设计容差, 设备经过多通道相位一致性校正补偿, 设置最大 15° 的相位差误差进行测向误差仿真。

2.2 逼近交互式多模型(IMM)测向滤波算法

针对复杂电磁环境中干扰信号影响测向精度的

问题, 本文采用基于逼近 IMM 测向滤波算法进行处理。该算法通过并行计算多个预测模型, 实时评估各模型与实测数据的匹配程度, 并动态计算模型间的概率似然比函数。在传统 IMM 算法基础上, 将模型交互步骤从滤波前调整至预测后, 直接利用目标的多基线相位差信息, 通过当前模型预测的概率值进行融合输出。这种改进的交互时序设计能够为测向结果的滤波测量更新提供更优的预测模型, 有效获得最合适的逼近值, 从而实现对测向结果异常值的精准剔除。逼近 IMM 测向滤波算法通过对预测模型之间的交互处理, 融合各模型滤波结果输出, 在保证算法稳定性的同时, 显著提升了在干扰环境下测向结果的可靠性^[13-14]。

逼近 IMM 测向滤波算法步骤主要如下:

1) 模型预测: 对第 $j=1, j=2, \dots, j=4$ 个预测模型, 将第 $k-1$ 时刻的滤波估计值 $\hat{X}_{klk-1}^j = \Phi_{klk-1}^j \hat{X}_{k-1lk-1}$ 、滤波估计方差 $P_{klk-1}^j = \hat{X}_{klk-1}^j P_{k-1lk-1} \hat{X}_{klk-1}^j$ 作为模型输入初始值, 进行模型预测; Φ_{klk-1}^j 表示第 j 组基线对应第 $k-1$ 时刻的相位差值。

2) 预测交互: 计算模型混合概率, 结合第 j 个模型更新数据, 形成预测交互结果;

3) 模型概率更新: 通过观测似然函数, 对第 $j=1, j=2, \dots, j=4$ 个模型概率进行更新;

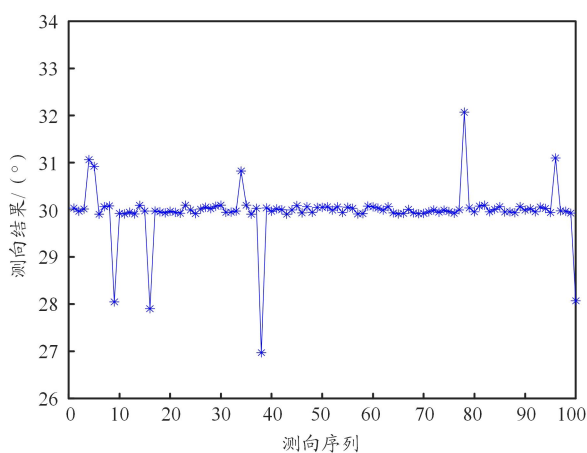
4) 预测融合: 获得新的观测量后, 通过最小化代价函数对当前模型观测量概率值结果进行预测融合;

5) 测量更新: 根据模型预测状态和观测似然函数, 按照卡尔曼滤波更新方法, 动态计算测量更新第 k 时刻的滤波值 $\hat{X}_{k/k}$ 和 $P_{k/k}$ 。

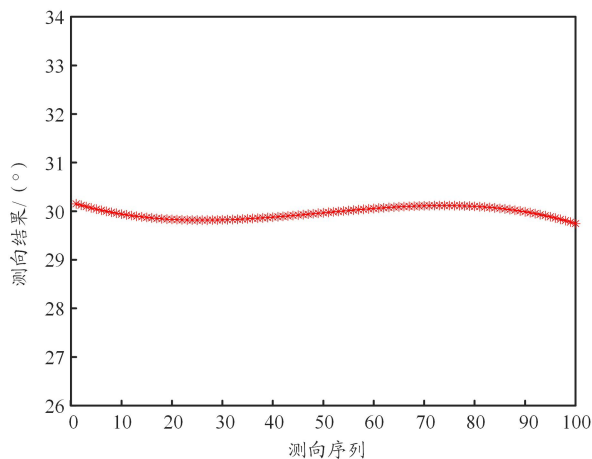
3 仿真分析

3.1 测向滤波仿真结果

为了验证测向滤波算法的性能, 本文以某型复杂体制雷达的实测数据为验证对象。选取信号入射角为 30° , 对连续 100 个脉冲的测向结果进行分析, 可以得到测向滤波前后的数据对比情况。具体的数据对比结果如图 4 所示。可以看出, 未经滤波处理的原始测向结果波动范围为 $27.2^\circ \sim 32.5^\circ$, 而经过逼近 IMM 测向滤波算法处理后, 数据波动范围显著收敛至 $29.7^\circ \sim 30.2^\circ$, 滤波效果明显改善。基于测向结果的动态变化特征, 算法设计了智能检测机制, 能够实时监测测向数据的异常波动。当检测到测向结果出现突变或消失时, 系

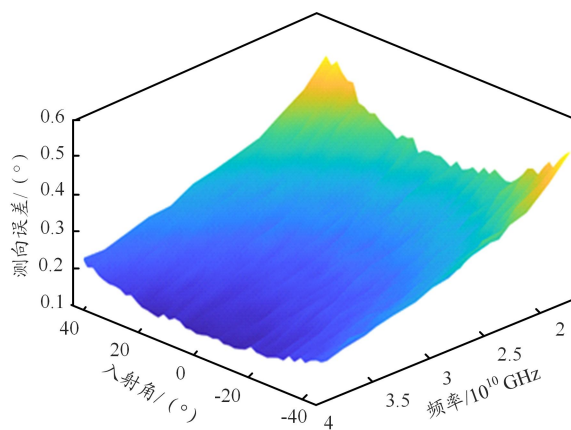


(a) 测向序列未经滤波的原始结果

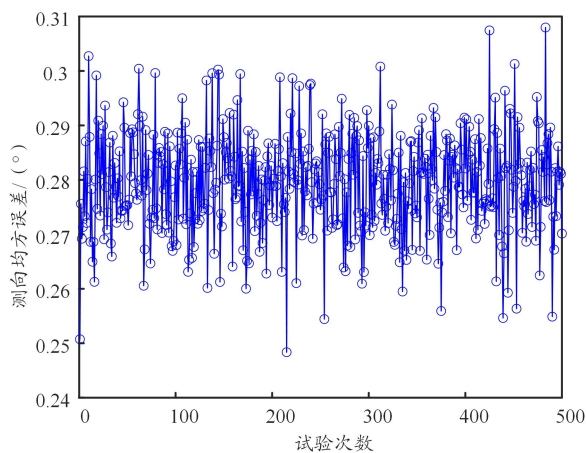


(b) 测向序列滤波后的结果

图4 测向滤波效果对比



(a) 不同频率不同入射角对应测向误差



(b) 测向均方误差值

图5 测向误差仿真结果

统自动触发模型切换或状态噪声参数调整,有效避免了滤波发散问题,确保了测向过程的稳定性和可靠性。这一结果表明,本文提出的滤波算法能够有效提升复杂电磁环境下的测向精度。

3.2 测向误差仿真结果

为评估毫米波干涉仪测向系统的性能指标,本文开展系统的误差仿真分析。仿真实验设置如下:工作频段覆盖 K 和 Ka 波段,测向角度范围设定为 $\pm 45^\circ$ (步进 2°),系统最大允许相位误差为 15° 。测向误差仿真结果如图5所示。基于500次蒙特卡洛试验的统计结果表明,在全部测试条件下,不同频率不同入射角对应测向误差结果变化规律,与多基线干涉仪测向误差公式理论趋势一致,测向结果的均方误差最大值控制在 0.31° 以内。仿真数据充分验证了该系统在宽角度范围内的测向精度稳定性,满足高精度无线电装备的技术要求($\leq 0.5^\circ$)。这一结果证明了本文提出的测向技术在毫米波频段具有优越的性能表现。

4 结束语

本文提出了一种基于微波光子的高精度毫米波测向技术,通过理论分析和实验验证解决了传统毫米波无源测向中的关键技术难题。该技术的创新性主要体现在3个方面:首先,采用基于并联MZM的相干光子变频技术,实现了毫米波信号的高保真传输与处理;其次,结合多基线相位干涉仪测向算法和多通道阵列天线校正方法,有效提升了系统测向精度;最后,通过设计的逼近IMM测向滤波算法,显著提高了测向稳定性。实验结果表明:测向数据波动范围从原始的 $27.2^\circ \sim 32.5^\circ$ 收敛至 $29.7^\circ \sim 30.2^\circ$,测向均方误差最大值控制在 0.31° 以内。这些数据充分验证了技术在宽空域、大带宽条件下的可靠性和精确性,展现了优异的性能表现。未来研究将重点从以下几个方面展开:优化光子变频链路设计以降低系统复杂度;改进多基线算法以提高实时性;将工作频段扩展至米波频段,实现更宽频谱范围的精确测向。本研究成果为新一代无

唐龙: 基于微波光子的高精度毫米波测向技术

线电装备的研制提供了重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] 高晖, 邓晔, 张金平, 等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 251–261.
- [2] 闫思瑞. 一种基于比幅测向对无频率信息的毫米波信号提高测向精度的方法[J]. 长江信息通信, 2023, 3: 21–24.
- [3] 赵阳莹. 毫米波数字阵列雷达中多目标来波方向估计[J]. 微波学报, 2017, 33: 222–225.
- [4] 饶肇敏. 基于压缩感知的毫米波无源测向技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [5] 杨仕铭, 李尚远, 谭伊璇, 等. 基于微波光子去斜接收的二维到达角估计方案[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 62–68.
- [6] 崔岩. 新型星载超宽带微波光子变频技术 [J]. 半导体光电, 2022, 43(5): 974–978.
- [7] 邹新海. 基于电光混频的光载微波信号变频技术基础研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [8] 王亚兰. 一种基于双驱 MZM 调制的全光变频链路方法[J]. 空军预警学院学报, 2019, 33(5): 337–340.
- [9] 陈岱付. 基于平面螺旋天线的环境电磁监测系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [10] PARK H R, LI J. Efficient sparse parameter estimation based methods for two-dimensional DOA estimation of coherent signals [J]. IET Signal Processing, 2020, 14(9): 643–651.
- [11] PRAVEEN M V, KRISHNAPURA N. High linearity transmit power mixers using baseband current feedback [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(2): 272–281.
- [12] 唐龙, 李小灰, 黄以明. 基于极化可重构阵列的信号多域测量方法研究[J]. 空天预警研究学报, 2022, 36(4): 275–280.
- [13] 李邱斌, 张贞凯, 田雨波. 目标跟踪时基于射频隐身的采样周期设计[J]. 信号处理, 2015, 31(9): 1112–1116.
- [14] 熊智敏, 王党卫, 马晓岩. 中段弹头 IMM-EKF 跟踪方法及性能分析[J]. 弹道学报, 2016, 28(4): 17–23.