
腔动力学赋能相干测距提升分辨力

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40887.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

腔动力学赋能相干测距提升分辨力。 导读

激光相干测距及基于其原理的激光雷达（LiDAR）是智能装备感知环境的核心技术，其凭借超高测量精度与抗环境光干扰的独特优势，在自动驾驶、精密制造、空间探测等领域发挥了重要支撑作用。然而传统方案中，测距分辨力的提升往往伴随着系统复杂度和成本的大幅增加，限制了该技术的实际应用范围。针对这一痛点，清华大学研究团队提出基于腔动力学增强的相位倍增技术——无需使用昂贵的器件和复杂的调制手段，仅通过回光注入调控激光器的腔动力学特性，将测距分辨力提升10倍以上，为下一代高分辨力、低成本感知系统提供了全新技术路径。相关研究成果以"Phase-Multiplied Interferometry via Cavity Dynamics for Resolution-Enhanced Coherent Ranging"为题发表于Light: Science Applications。博士后王一帆、博士生刘劲松、林晨啸为论文共同第一作者，谈宜东教授为通讯作者。

以调频连续波（FMCW）为代表的相干测距方法已在精密制造、智能感知、安防监控等领域得到广泛应用。随着人工智能技术的迭代与制造业产业升级的推进，三维形貌重建、高精度定位等需求对测量系统的分辨能力提出了更高要求。根据FMCW测距原理，光源的扫频带宽是决定测距分辨力的关键因素。当前提升分辨力的方案主要分为两类：一是优化光源参数或研制新原理激光器（如傅里叶域锁模激光器），拓展光源自身扫频带宽；二是采用多光源信号拼接技术，通过时域信号延拓等效扩大扫频带宽。尽管这些方法能显著提升性能，但均需使用额外调制器件或高复杂度处理算法，不仅推高了系统成本，还增加了光源控制与信号解析的难度。

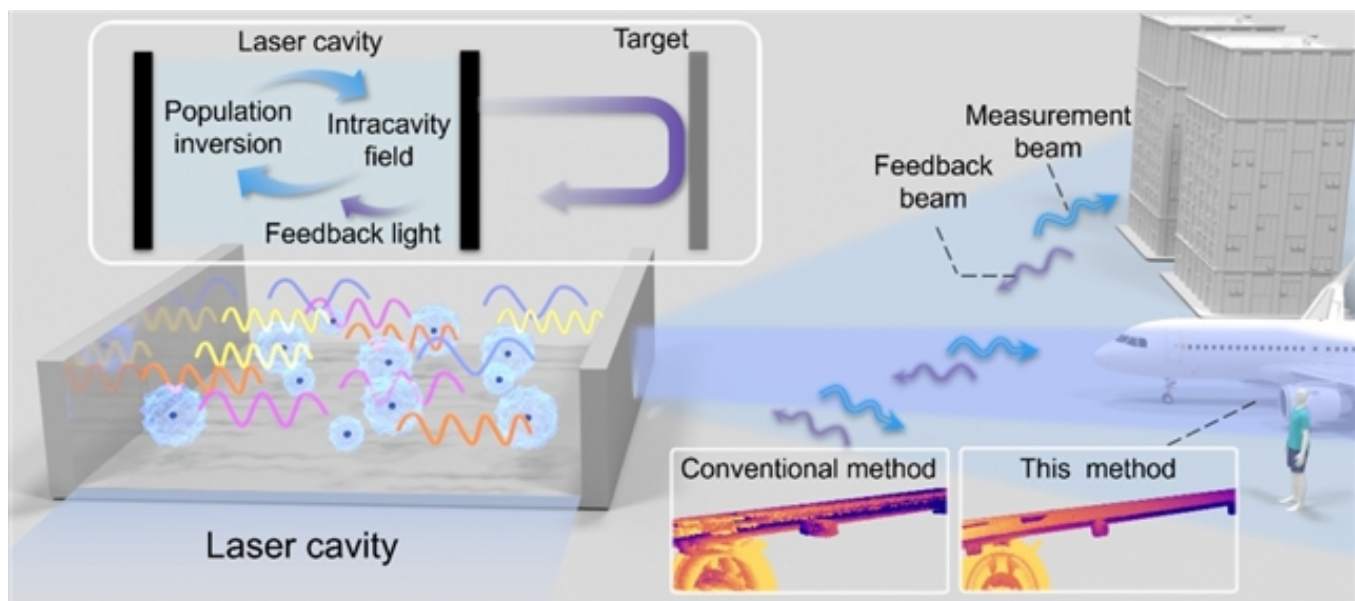


图1：基于腔动力学实现分辨力提升的测距方案

针对这一技术瓶颈，研究团队另辟蹊径，提出基于腔动力学实现相位倍增的测距方案，在不增加物理调制带宽的前提下，实现了分辨力的倍数提升（图1）。方案核心在于利用激光回馈效应：扫频激光器的输出光照射目标后，微弱的散射光会反向注入激光器谐振腔，这一过程打破了腔内光子数与反转粒子数的原有平衡，进而调制激光器的频率与强度，最终激发出干涉信号的谐波。与基频干涉信号相比，谐波信号具有更高的相位灵敏度，等效于实现了更大的扫频带宽。对谐波信号解调，可实现更高分辨力的距离测量。这种方法对弱回光信号具备高灵敏性，且无需复杂调制手段，解决了传统方案中性能与复杂度的权衡难题。同时，谐振腔内干涉的构型省去了激光器外部的参考臂，进一步简化系统结构，使装置更紧凑（图2a）。

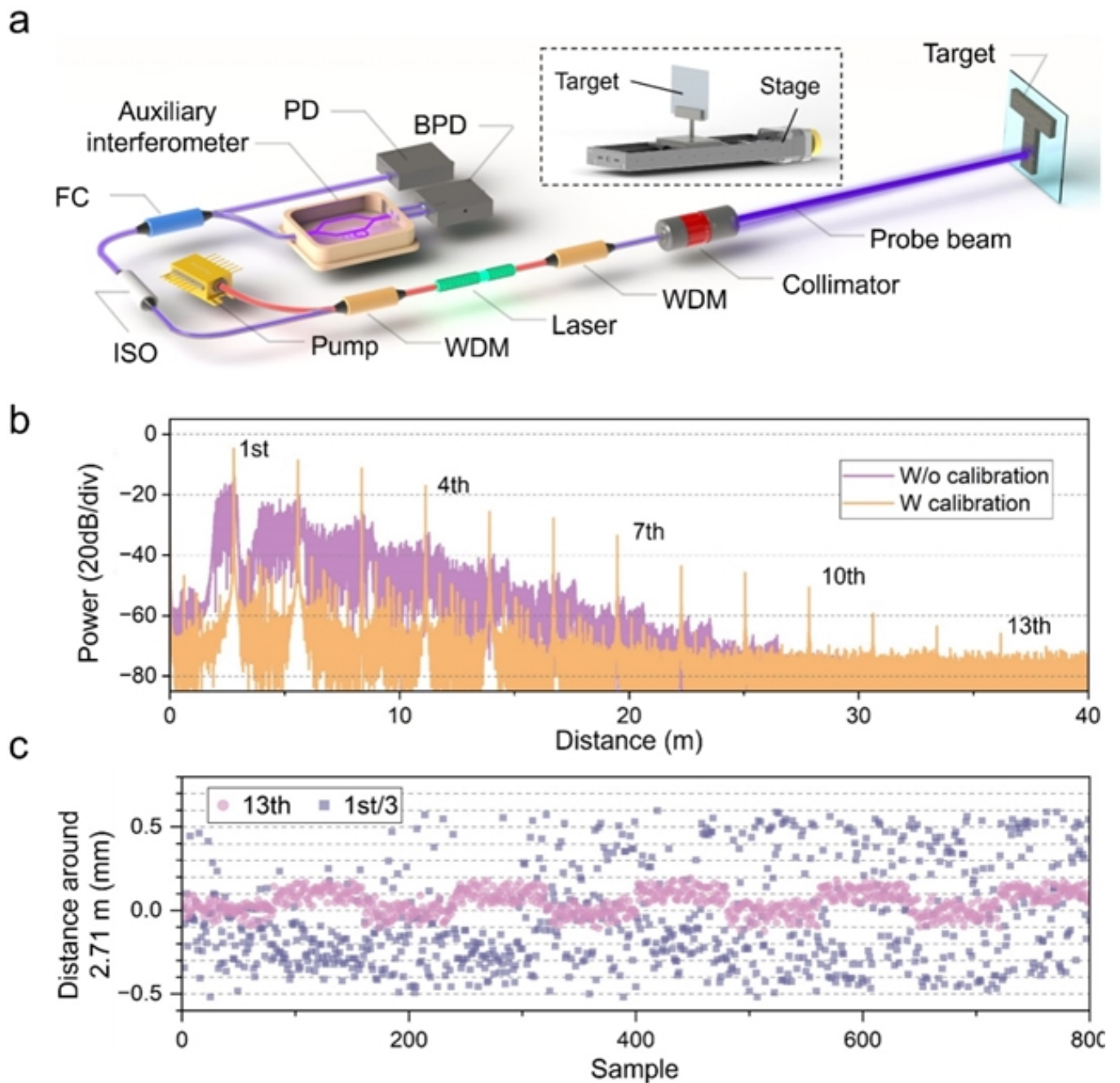


图2：距离测量系统与结果 a 测量装置；b 谐波激发结果；c 基于13阶谐波的分辨力测试

实验结果验证了该方案的优越性：系统在 μW 量级的注入功率下，成功产生10阶以上谐波（图2b）；随着谐波阶次的提升，测距信号的半高全宽（FWHM）呈反比减小、分辨力同步提升。基于13阶谐波对光亮表面0.1mm的步进运动进行重建，测量分辨力较基频信号显著提升（图2c）；在精密度测试中，对多个位置进行80次重复测量，标准差均小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。团队进一步构建三维成像系统，以15GHz扫频带宽对目标进行重建，结果显示基于3阶谐波成像效果远超同等扫频带宽下的传统测量方法(图3)。

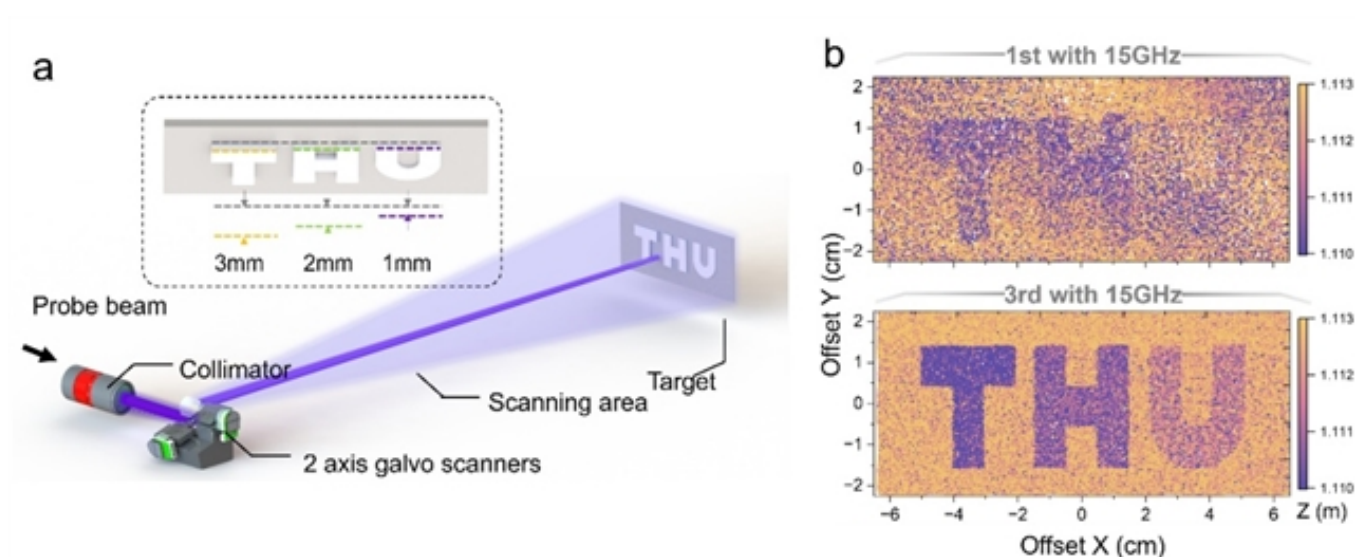


图3：三维重建结果 a 扫描系统与被测目标；b 15 GHz扫频带宽下的重建结果

总结与展望

研究工作创新性地将激光回馈效应与非线性腔动力学结合，打破了传统相干测距中扫频带宽对测距分辨力的固有制约，实现3~13倍测距分辨力的跨越式提升。所提方案借助腔内干涉机制，无需外部参考光路，实现了高精度、低成本、结构紧凑、抗干扰的多重优势统一，在远程目标跟踪定位、精密制造检测等场景中具有广阔应用前景。值得一提的是，该方法的应用场景并非局限于相干测距系统——其核心原理同样适用于外差干涉系统，可基于非线性腔动力学实现外差干涉信号的谐波产生与相位灵敏度提升，为各类基于干涉原理的精密测量系统提供新的物理机制与技术路径。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02160-x>

作者：谈宜东等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发