基于啁啾能量振荡波的高速运动精密探测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41457.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！

导读

精密的高速运动跟踪与速度测量是先进制造、机器人技术及现代物理学等领域的关键基础技术。然而，现有探测方法如多普勒测速、双梳干涉测量等，受限于系统机制，难以在保证速度与精度的同时实现方向无模糊探测，因而无法满足先进制程等精密制造场景中对高速运动部件进行精准监测的需求。

近期，重庆大学朱涛教授团队提出了一种基于啁啾能量振荡波的高速运动精密探测技术。该技术通过对超快脉冲激光进行色散调控，生成用于干涉测量的双扫频激光，并利用动态位移与干涉信号中啁啾能量之间的精确映射关系，实现了MHz级测量帧率与亚微米级动态位移测量精度。这一技术为发展先进、快速、高精度的激光雷达系统开辟了全新路径。

该成果以 Precise motion tracking and velocimetry using chirped power oscillation wave 为题发表在Light: Advanced Manufacturing，重庆大学朱涛教授、李雨佳副教授，电子科技大学姚佰承教授为本文通讯作者，重庆大学博士研究生杜伟为本文独立第一作者。

精密测距与测速是现代物理、工程技术及材料科学等领域的核心挑战，在高速运动轨迹监测、微纳尺度实验以及复杂动态系统中发挥着不可替代的作用。随着激光技术的快速发展与超快脉冲激光器的问世，科研人员已开发出多种兼具极高时间与空间分辨率的动态测量工具。特别是超快激光脉冲，能够在纳秒甚至皮秒时间尺度上，以极高的时间精度捕捉物体位移的微小变化，从而实现对高速运动部件的实时动态轨迹监测。

光子多普勒测速与双光梳干涉是当前精密动态位移及速度测量的主流技术之一，二者均通过分析拍频或重复频率差实现高精度测量。然而，这些传统方法仍面临多项关键瓶颈：光子多普勒测速需要复杂的外差结构来判别方向，高速测量时需引入频移器，不仅增加成本，且频率稳定性直接影响测量精度，同时难以兼顾高精度与高更新帧率。尽管双光梳系统利用光频梳优异的相干性可实现超精密时频测量，但光纤双光梳的重复频率差仅为kHz量级，严重限制了高速测量能力；双孤子微腔光梳虽能达到MHz级重频差，但其非模糊测量范围被限制在毫米级。此外，光梳色散干涉法受限于CCD采样率（<100 kHz），动态测量帧率严重制约了测速性能。上述问题导致现有技术难以同时满足高速、高精度、大范围及方向判别等需求，严重限制了其在动态测量领域的应用拓展，亟需开发一种兼具高速度、高精度与系统简洁性的新型测量技术。

该工作创新性地提出基于色散调控的双扫频激光（DCDSL）干涉形成的啁啾能量振荡波（CPOW），实现了高精度动态位移与速度测量。通过监测CPOW中零频点（ZFP）的高信噪比强度振

荡，可反演亚微米精度的动态位移，进而通过微分获得速度信息。实验成功揭示了电控位移台在毫秒时间尺度上速度的快速变化。与传统多普勒测速不同，该方法无需傅里叶变换分析频差，直接利用时域强度信号，从而突破了短时域内频率分辨率的根本限制，消除了更新帧率与测量精度之间的固有限制。该技术为动态定位、轨迹跟踪及表面形变快速分析等应用提供了新的技术基础。

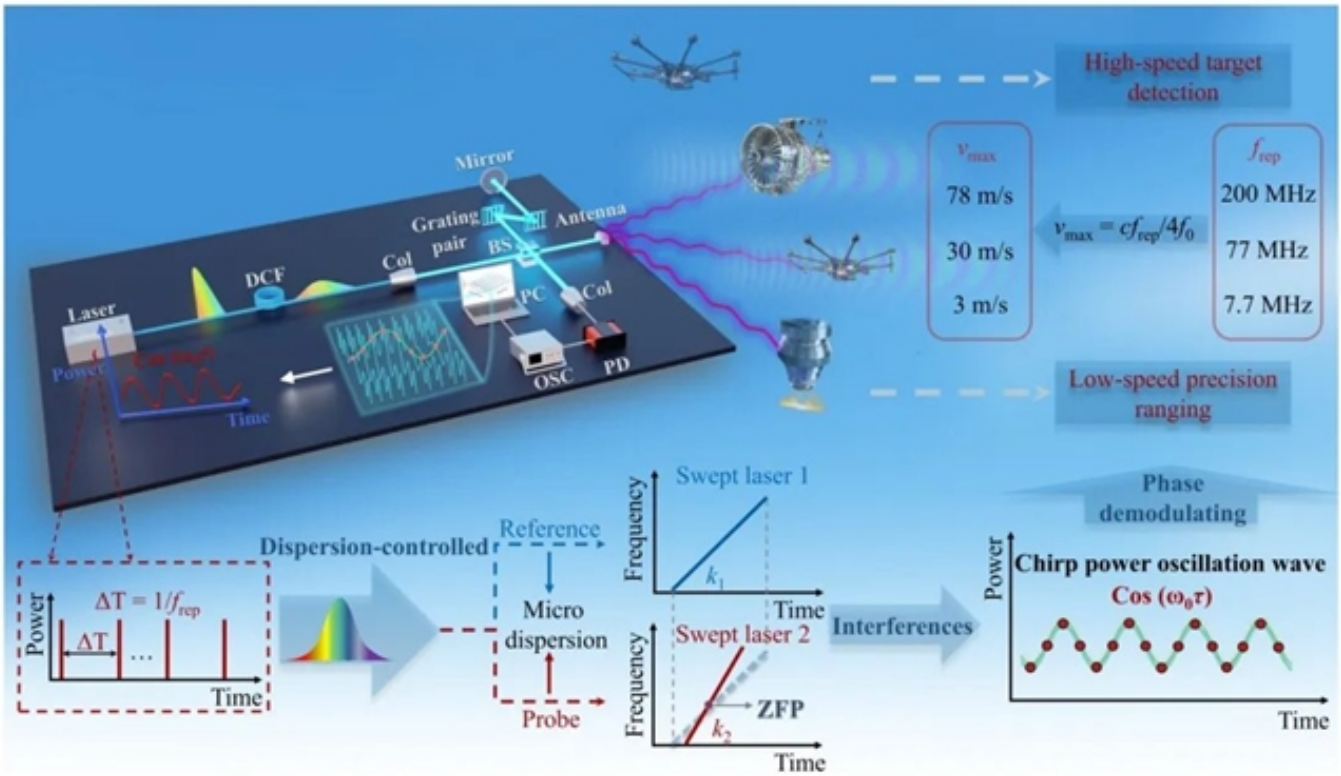


图1：基于CPOW方法的精确运动跟踪和速度测量的概念设计及原理

图源：重庆大学

该动态测量方法基于双扫频激光干涉原理。两束经精确色散调控的扫频光在干涉过程中形成零频点，即两路扫频曲线的交点。当被测目标运动时，该零频点处的干涉信号强度发生周期性振荡，产生啁啾能量振荡波。利用高速光电探测器采集这一时域强度信号，并对CPOW进行相位解调，可直接提取目标运动引入的时间延迟，进而反演出亚微米精度的动态位移轨迹，再经微分获得瞬时速度。该方法无需通过傅里叶变换分析频差，仅依赖时域强度信息，从而突破了频域分辨率对测量更新帧率的限制，能够在纳秒至毫秒时间尺度上实现高精度、高帧率的动态位移与速度测量。

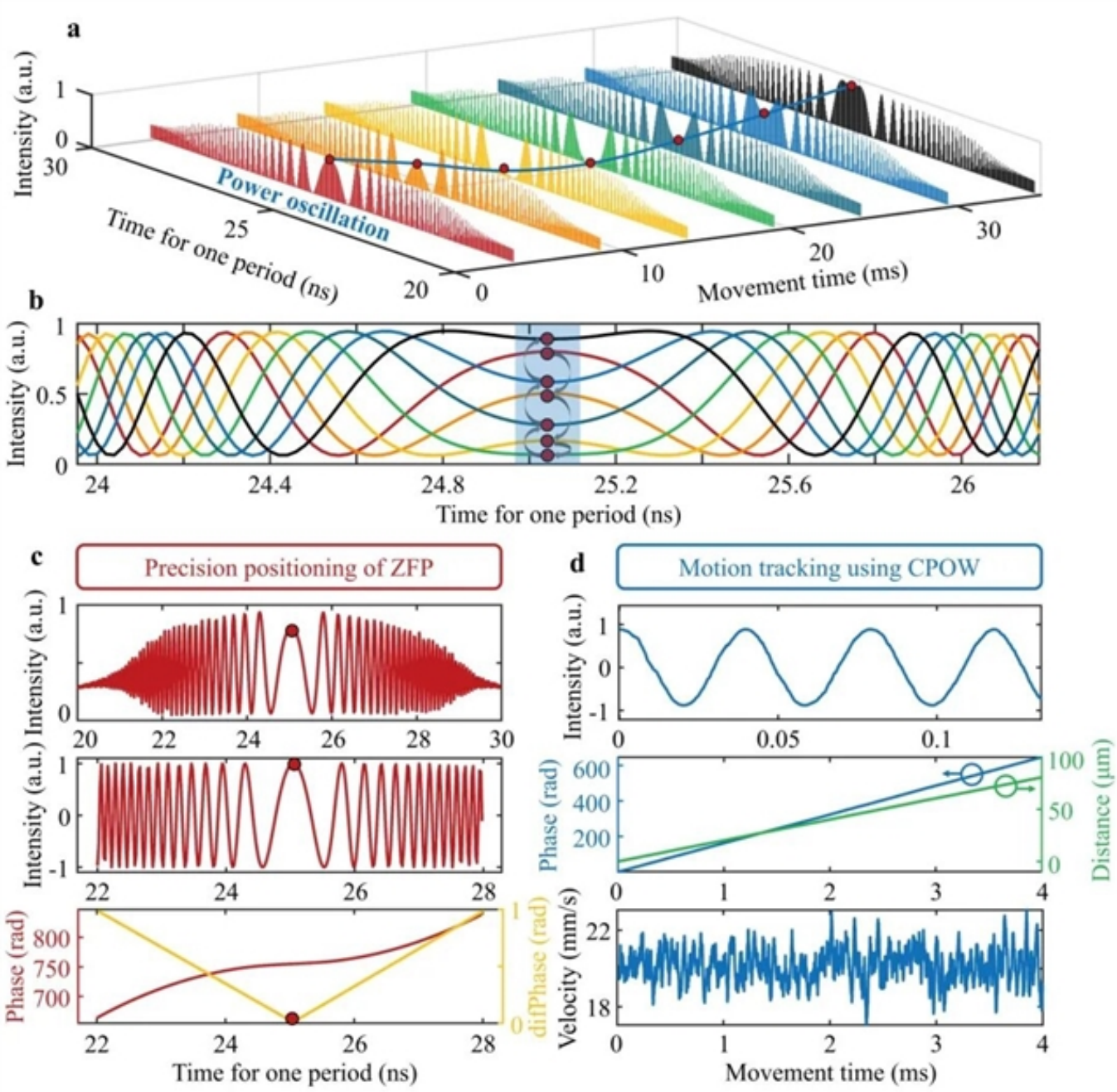


图2：基于CPOW的精密探测原理

基于所提出的方法，团队在约1.9米的距离上对精密位移台开展了动态追踪实验。在50 GS/s的采样率下，实测结果表明：当运动速度为23.7 mm/s时，系统测得的位移曲线与计量校准值相比，最大偏差为950.8 nm，标准差为429.7 nm，达到了亚微米级精度。进一步在－23.7 mm/s至23.7 mm/s范围内设置8个不同的速度，并在4毫秒时间窗口内进行实时位移测量，各速度下的均方根误差均低于1 μm。此外，该技术成功捕捉到由电机振动所引发的瞬时速度幅值与频率波动，充分验证了其在动态位移探测中出色的亚微米精度以及宽速度范围内的适应能力。

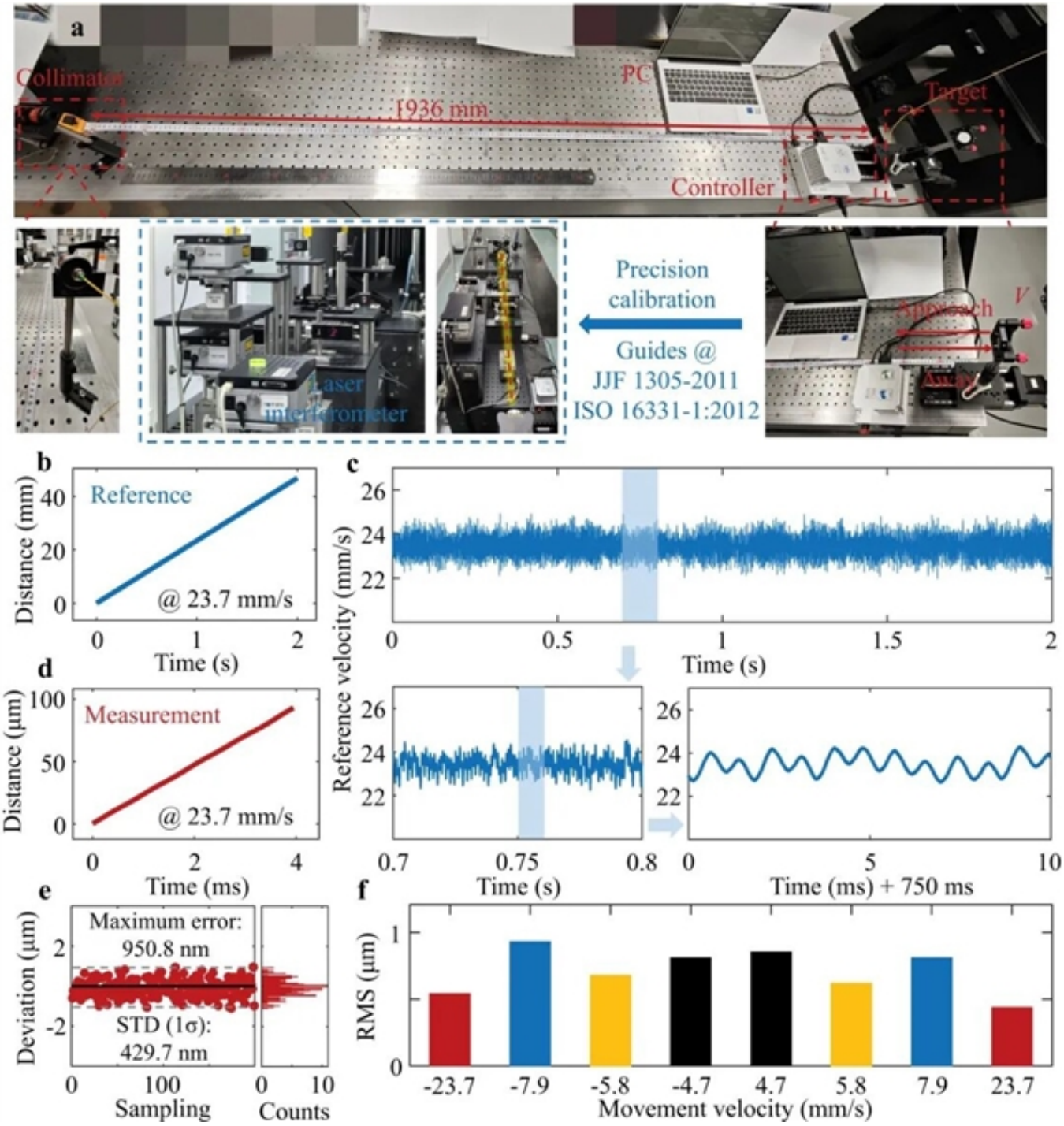


图3：目标位移轨迹的实时探测结果及其统计分析

团队进一步研究了精密位移台启动过程中的瞬时速度特性。通过采集8个不同速度下的干涉信号彩图发现，啁啾能量振荡波的波形变化能够实时反映瞬时速度的动态演变过程，且其变化方向可直接用于判别运动方向。对4毫秒时间窗口内的瞬时速度进行解算与拟合，结果表明在23.7 mm/s的速度下，电机所引发的振动频率约为1 kHz。该实验充分验证了所提方法在瞬态速度捕捉及运动方向判别方面的有效性，以及其优异的高时间分辨率优势。

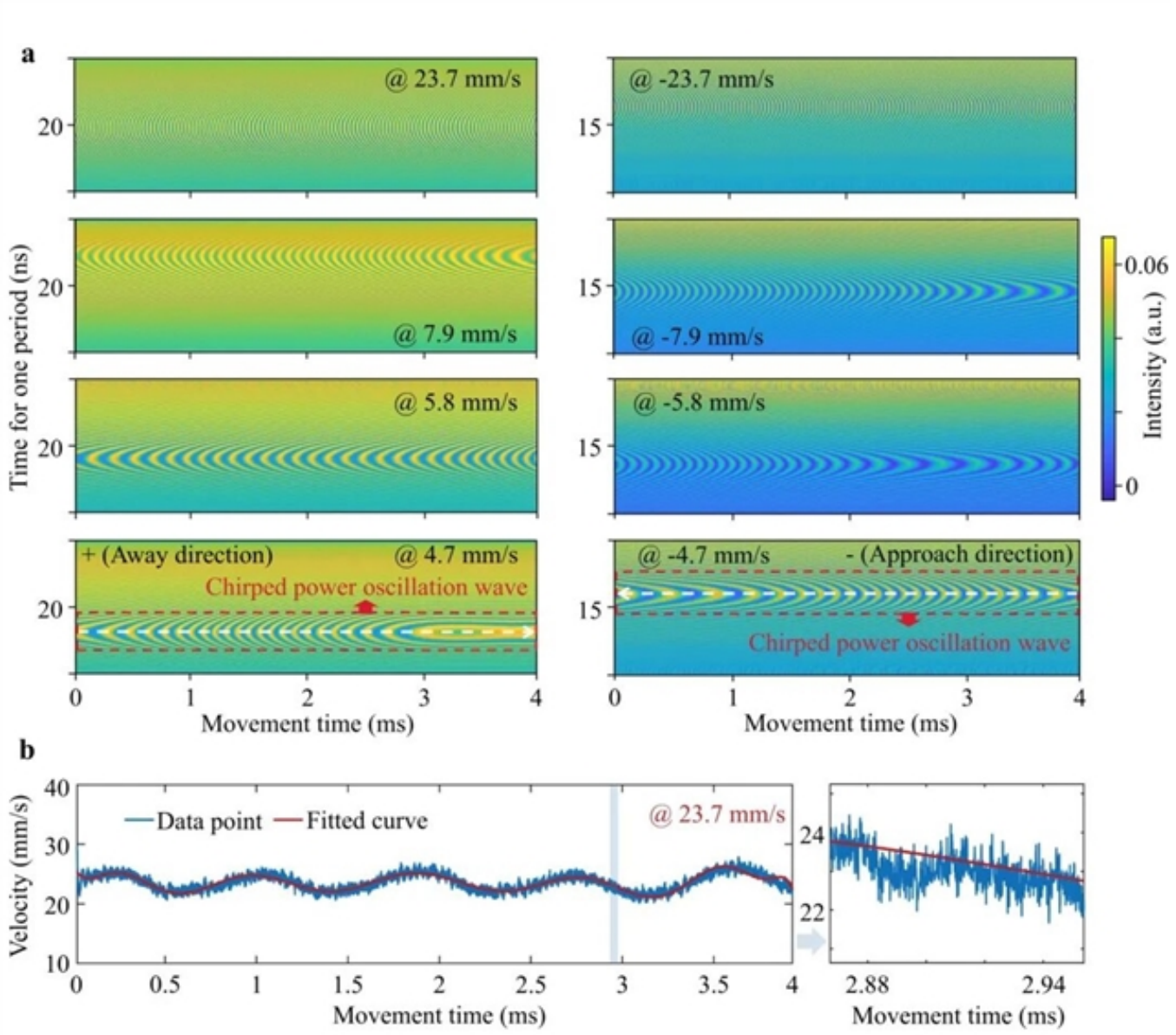


图4：精密平移台的瞬时速度探测

总结与展望

该研究提出的基于啁啾能量振荡波的动态轨迹探测方法，将超快脉冲激光的时域性能与色散干涉测距的高精度优势相结合，突破了传统多普勒测速在方向判别、测量精度与更新帧率之间的固有矛盾。该方法无需依赖频移分析，仅通过监测啁啾中心处的干涉强度变化，即可实现高速、大动态范围测量。实验验证了其在精密动态位移与瞬时速度监测中的亚微米精度及毫秒级响应能力。未来，结合片上光频梳与光子集成技术，该CPOW方法有望发展为先进的超快激光雷达系统，在超精密制造、健康监测等领域的动态追踪与高速测速中展现出广阔的应用前景。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.033

作者：朱涛等 来源：《光：先进制造》

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转发