doi：10.11823/j.issn.1674-5795.2025.06.01

基于微腔光频梳的精密测距技术研究进展综述

黄博航[1]，姜廷皓[1]，赵春播[2]，武腾飞[2*]，何广强[1,3*]

（1.上海交通大学 信息与电子工程学院集成电路学院 光子传输与通信全国重点实验室，上海 200240；
2.中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所，北京 100095；
3.华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室，上海 2000062）

摘　要：介绍了基于孤子微腔光梳的精密测距技术基本原理及其在芯片级集成、高精度与高速度等方面的优势。阐述了微腔单光梳线性调频连续波、混沌测距、色散干涉与合成波长法，以及双光梳测距的原理与实现方法。探讨了重复频率锁定、频率扫描和并行成像等发展路径。指出该领域研究已从原理性验证迈向性能优化与实用化探索的新阶段。提出未来技术演进将趋向系统级光电全集成、多功能可重构与跨领域深度融合，推动芯片级精密激光雷达在车载感知、工业计量、空间探测等场景的规模化应用。

关键词：微腔光频梳；绝对距离测量；调频连续波；色散干涉；合成波长；双光梳测距；集成光子学；精密测距

中图分类号：TB96；TN929；O433　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-5795（2025）06-0010-19

Research progress review on precision ranging technology based on microcombs

HUANG Bohang[1], JIANG Tinghao[1], ZHAO Chunbo[2], WU Tengfei[2*], HE Guangqiang[1, 3*]

(1. State Key Laboratory of Photonics and Communications, School of Information Science and Electronic Engineering & School of Integrated Circuits, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;
3. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The basic principles of precision ranging based on soliton microcombs and their advantages in chip-level integration, high precision, and high speed are introduced. The principles and implementations of single-microcomb frequency-modulated continuous wave, chaotic ranging, dispersive interferometry, synthetic-wavelength metrology, and dual-comb ranging are elaborated. The development paths such as repetition frequency locking, frequency scanning, and parallel imaging are discussed. It is pointed out that the research in this field has progressed from proof-of-concept demonstrations to a new stage focused on performance optimization and practical exploration. It is further proposed that the future development will be characterized by system-level full optoelectronic integration, multifunctional reconfigurability, and deep cross-disciplinary convergence, through which a large-scale deployment of chip-scale precision LiDAR in automotive perception, industrial metrology, space exploration, and related applications is expected to be enabled.

收稿日期：2025-08-19；**修回日期：**2025-09-04

基金项目：国家自然科学基金项目(62575176)；微波光子技术四川省重点实验室基金项目(2023-04)；计量与校准技术重点实验室基金项目(JLKG2024001B002)；导航与时空技术国家级重点实验室自主基金课题(WXDHZZJJ20250103)

引用格式：黄博航，姜廷皓，赵春播，等．基于微腔光频梳的精密测距技术研究进展综述[J]．计测技术，2025，45(6)：10-28.

Citation：HUANG B H，JIANG T H，ZHAO C B，et al. Research progress review on precision ranging technology based on microcombs[J]. Metrology & Measurement Technology，2025，45(6)：10-28.

Key words: microcavity optical frequency comb; absolute distance measurement; frequency modulated continuous wave; dispersive interferometry; synthetic wavelength; dual-comb ranging; integrated photonics; precision ranging

0 引言

光学频率梳(Optical Frequency Comb，OFC)[1-3]是由一系列频率间隔均等、相位关系稳定的窄线宽离散谱线构成的光场结构，在时域上表现为一串超短脉冲序列，在频域上则兼具THz量级的超宽光谱覆盖范围与MHz至GHz量级的稳定频率间隔。凭借其在光频与射频之间建立相干联系的独特能力，OFC成为超高精度频率传递与同步的核心工具，极大地推动了现代物理学相关领域的发展进程，该领域的开拓者HALL J L和HANSCH T W也因其巨大的科学价值与应用前景，荣获2005年度诺贝尔物理学奖[4-5]。

近几十年来，激光雷达(Light Detection and Ranging，LiDAR)凭借高距离/速度分辨力、强抗干扰性与易于小型化的技术优势，成为光电信息领域的研究热点[6]。在卫星飞行编队[7]、自动驾驶[8]、微纳半导体加工、空间探测等应用场景中，绝对距离测量(Absolute Distance Measurement，ADM)需满足高精度、大测程、高刷新、强抗干扰、工程可用等核心需求。传统测量技术中，单频激光、宽带非相干源难以兼顾测程覆盖、测量稳定性、相干增益与实时性。与之相比，OFC凭借其优异的频率稳定性、宽光谱范围和良好相干性，不仅革新了时间和频率计量学的发展范式，更显著提升了LiDAR的测距精度、信号采集速度并延长测距范围，展示出前所未有的精密测量能力[9-12]，因而成为新一代高精度测距光源的有力候选方案[13-14]。

近年来，芯片级微谐振腔的研究推动了孤子微腔光梳的迅速发展[15]。微腔光梳[1, 16-23]是在高品质因子(Q值)微谐振腔内产生的相位锁定时域孤子序列，具有GHz量级的超高重复频率、高稳定性、低功耗、与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS)工艺良好兼容的技术特征[24-25]。凭借梳齿逐齿可分辨、相位噪声低与易集成等特性，微腔光梳已在低噪微波产生、精密光谱分析、光通信、长度计量等领域中展现出巨大潜力[26, 32]，并推动高性能测距设备从传统庞大的台式OFC向小型化、工程化方向转型。在测距应用场景中，微腔光梳既可作为单源，结合调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave，FMCW)扫频、混沌调制、色散干涉及合成波长等方法实现绝对测距；也可作为双光源构成双梳异步采样体系，实现大非模糊距离(Non Ambiguity Range，NAR)、高刷新率与多通道并行探测的性能融合，从而满足远距离高精度测距需求。

本文系统综述微腔光梳测距技术的研究进展，梳理各类方法的原理、关键创新与性能指标。首先，回顾微腔单光梳测距中FMCW法、混沌测距法、色散干涉法与合成波长法4种典型方案的发展现状；其次，综述微腔双光梳测距在异步采样、相干锁定、并行成像与长程测距等方面的突破，围绕NAR、测量精度、刷新率与系统复杂度进行对比并归纳研究成果，探讨可调重频差、呼吸光谱、光子级运行等趋势。最后，总结微腔光梳测距技术当前的挑战并展望未来发展方向，为未来高性能、可集成的微腔光梳测距研究提供参考。

1 微腔单光梳测距

1.1 线性调频连续波法

FMCW测距是一种成熟的相干探测技术。其核心原理为：对发射信号进行线性频率扫描(即“啁啾”)，利用目标反射回波信号与本地参考信号之间的频率差来解算目标距离。该过程通过对泵浦激光进行线性频率扫描实现——得益于微腔内稳定的非线性锁模过程(特别是稳定的孤子状态)，泵浦激光的频率变化会稳定地传递给微腔光梳的每根梳齿，从而实现多通道并行FMCW测距，极大提高信噪比与抗干扰能力。

设泵浦光频率为$f(t) = f_0 + S$，其中，f_0为初始频率，S为频率扫描速率。经目标反射会存在时间延迟$\tau = 2D/c$，其中，D为目标距离，c为光速。则回波光与本地参考光之间干涉产生的拍频f_{beat} =

$S\tau = S(2D/c)$。对拍频信号进行快速傅里叶变换后，即可找到峰值，计算得出$D = cf_{\text{beat}}/2S$。

2020年，瑞士洛桑联邦理工学院Kippenberg团队的RIEMENSBERGER J等人[33]在微腔光梳FMCW测距领域取得了里程碑式进展——首次利用单个集成光子芯片上的孤子微腔光梳，成功构建了大规模并行相干LiDAR系统。该系统实现了无需机械扫描的高速、高精度、多通道FMCW测距，为LiDAR系统向小型化、芯片化的演进开辟了极具前景的技术路径。

该研究团队采用连续波激光器泵浦自由光谱范围(Free Spectral Range，FSR)约为99 GHz的高Q值氮化硅(Si_3N_4)微腔，以产生稳定的孤子微腔光梳；随后通过电光调制器对泵浦激光频率施加线性三角波扫描，从而构建了完整的微腔FMCW测距系统，系统示意图如图1(a)所示。在并行测距实验中，经100 kHz三角波调频的光梳经准直器发射后，由透射光栅(966 lines/mm)按波长在水平轴上进行色散分离，实现对目标的同步多点位测量，实验装置示意图如图1(b)所示。实验结果表明：在10 m距离测试中，30个并行通道中25个的测距不确定度低于1 cm；且三维(Three Dimensional，3D)成像结果显示：30个通道均实现cm级测量精度，其等效像素测量速率高达300万像素/秒，性能显著优于此前FMCW LiDAR系统，实验结果如图1(c)、图1(d)所示。

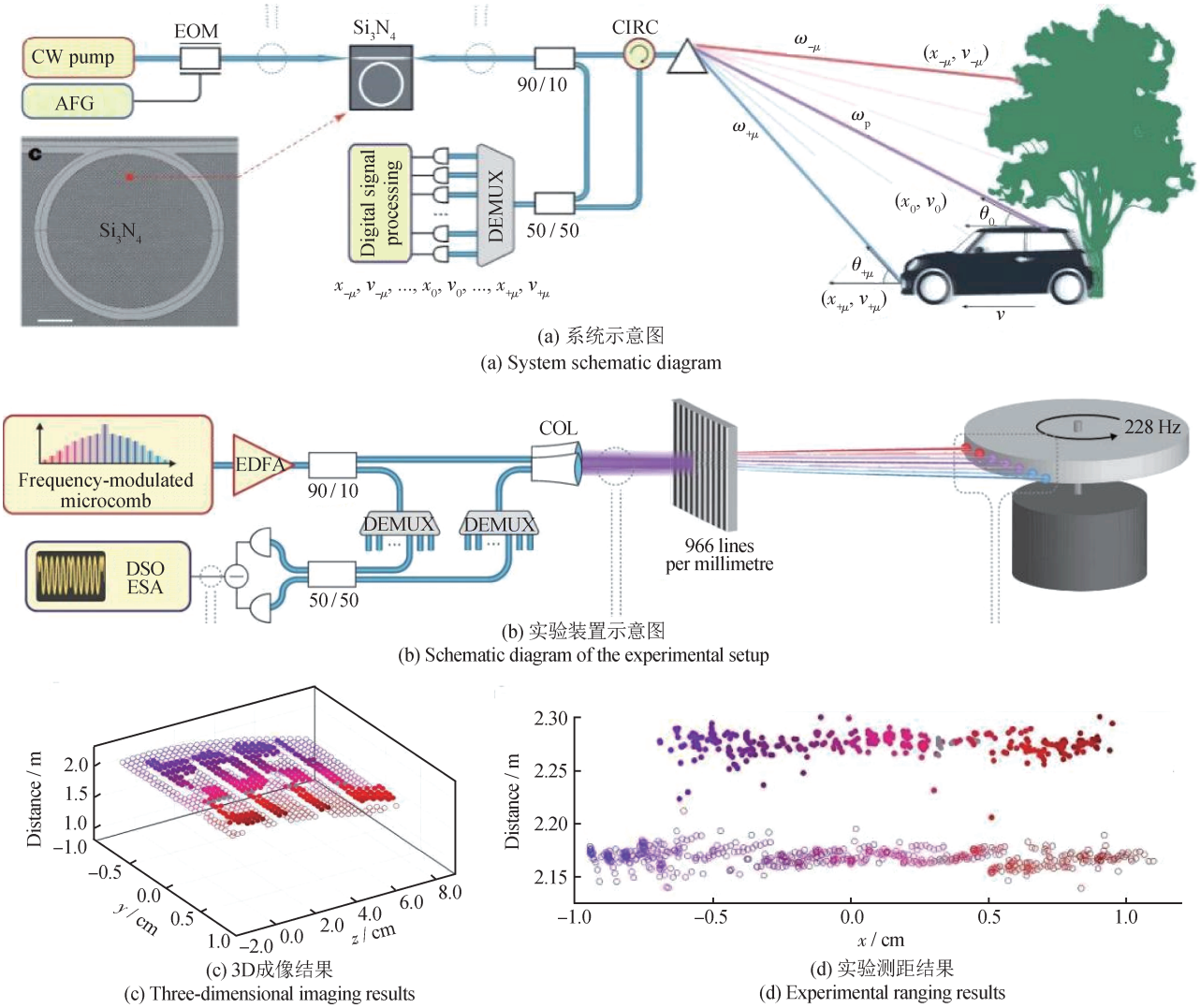


图1　FMCW测距实验[33]

Fig.1　FMCW ranging experiment[33]

扫频激光源的固有调频非线性是制约FMCW测距性能的核心瓶颈——其会破坏拍频信号与距离之间的理想线性映射，导致频谱展宽，从而显著降低FMCW测距的精度与分辨力。针对该瓶颈，天津大学张福民教授团队的JIA L H等人[34]于2021年提出了一种基于高重复率孤子微梳的非线性校准方案，实验装置示意图如图2所示。该系统将三角形FMCW激光分为2路：主路用于常规测距，辅路与片上Si_3N_4微腔孤子梳(中心波长约为1 560. 2 nm，F_{SR} = 48. 97 GHz)拍频生成标定信号。当扫频跨越梳齿时，辅路会产生等间隔的近零拍频校准峰。基于测距信号相位与频率间隔的线性关系，通过提取校准峰位置并计算相邻峰相位增量，以最小二乘拟合求得斜率，可反演得到距离。该方案区别于传统“将微腔光梳直接作为并行FMCW光源”的方案，以微腔光梳为超稳频率标尺，无需锁相环即可实现FMCW扫频非线性的实时精确校准。在0 ~ 2 m，测量误差不超过± 20 μm。2022年，该研究团队取得进一步突破，在单片硅基芯片上实现非线性校准[35]：以片上微腔稳定的FSR为标尺，并利用等频超立方网络(Equal Frequency Hypercube Network，EFHN)算法，在等频区间对测距相位进行线性回归。经双靶干涉标定，F_{SR} = 49. 346 9 GHz。在1 540 ~ 1 560 nm扫频测试中，10. 24 s平均测量时间下，室内4. 48 m处的最小Allan偏差低至65 nm，室外438 m处的最小Allan偏差仅为420 nm，且成功实现3D点云成像，显著提升了系统的集成度与实用性。

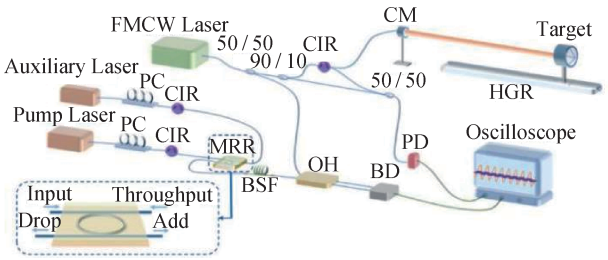


图2　实验装置示意图[34]

Fig.2　Schematic of the experimental setup[34]

光源能否同时满足“高速扫频”与“超窄线宽”需求，是实现FMCW测距性能突破的另一核心制约因素。基于高Q值Si_3N_4集成微腔的混合自注入锁定激光器已展现出卓越相干性(洛伦兹线宽可达亚赫兹量级[36-37])，但快速频率驱动能力受限。而具有大Pockels系数的铌酸锂($LiNbO_3$)集成光子平台则为开发频率捷变激光源提供可能[38]。2023年，Kippenberg团队的SNIGIREV V等人[39]通过异质集成技术，研制出一款兼具超窄线宽与超快调谐能力的片上激光器。将薄膜$LiNbO_3$调制器集成于低损Si_3N_4波导，并与分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser，DFB)实现自注入锁定。该设计兼顾了超低损耗与超快电光响应特性：锁定后的激光器线宽从自由运行时的MHz级锐减至约3 kHz，并能实现约10^{15} Hz / s量级的瞬时调啾速率，在0 ~ 1 GHz进行线性调谐，典型单次频偏约500 MHz。基于该高性能光源构建的相干FMCW测距系统，采用三角扫频和双本振外差探测技术，成功获取室内3 m级目标清晰的3D点云图像，充分验证了该新型激光器的实用价值。

2025年，浙江大学时尧成教授团队的CHEN J Y等人[40]提出了全固态可并行发射与相干接收的FMCW LiDAR原型，系统概念示意图如图3所示。首次将孤子微腔光梳与光学相控阵(Optical Phased Array，OPA)2种关键集成光子技术协同整合，成功实现了并行的FMCW3DLiDAR。该研究团队在高Q值的Si_3N_4微谐振腔中产生F_{SR} = 101. 3 GHz的单孤子微梳，通过任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator，AWG)驱动单边带调制器(Single Sideband Modulator，SSB)对泵浦光施加线性三角扫频(带宽3 GHz，周期10 μs)，使光梳所有梳齿获得相同频率调啾。调啾光梳分为本振光与信号光2路，信号光导入绝缘体上硅(Silicon On Insulator，SOI)平台集成的OPA中——该OPA巧妙地利用其光栅天线的色散效应实现垂直方向的多通道并行发射，同时通过电控移相器实现水平方向上的无惯性协同扫描；目标物体返回的信号光与本振光相干拍频后，解析出距离信息。实验结果表明：系统使用2通道(1 552. 78 nm和1 547. 78 nm)成功分辨1. 1 m处间隔15 cm的2块反光靶，标准差达cm量级，并利用7个并行通道完成3D点云重建。

同年，清华大学鲍成英教授团队的CAI Z Y等人[41]创新性引入Si_3N_4孤子微梳作为频率标尺，解

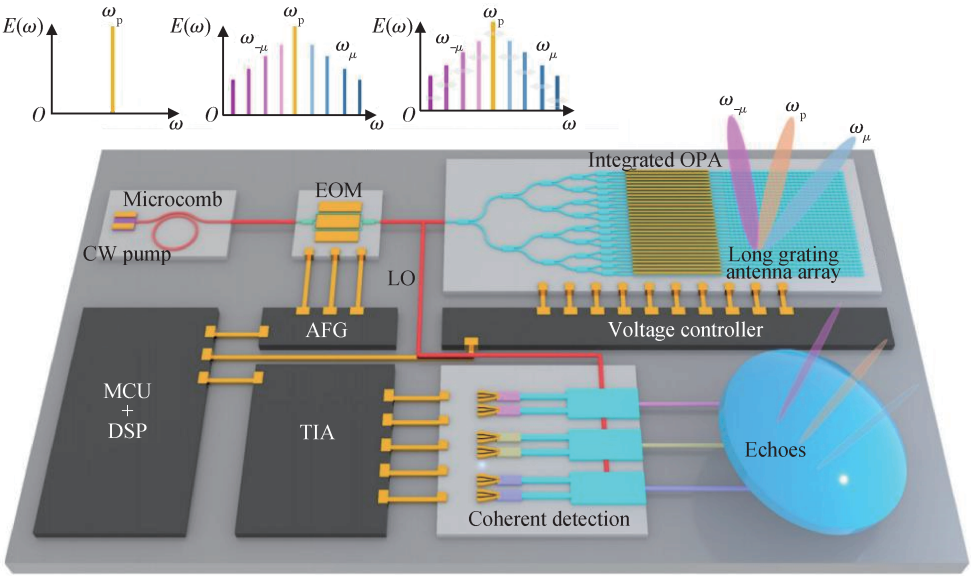
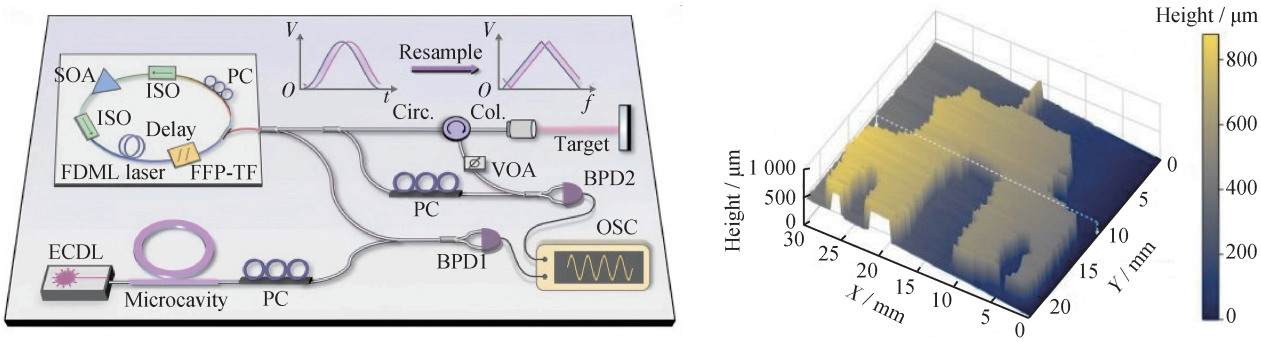


图3 FMCW系统概念示意图[40]

Fig.3 Conceptual illustration of FMCW system[40]

决了傅里叶域锁模(Fourier Domain Mode Locking, FDML)激光器等超快扫频源的调频非线性问题，实现超高啁啾速率的FMCW测距。在该系统中，FDML激光器以24.6 kHz的频率在33 nm波段内进行近正弦扫频，瞬时啁啾速率高达320 PHz/s，系统结构及3D成像实验如图4所示。



(a) 系统结构示意图
(a) System architecture diagram

(b) 3D成像结果
(b) 3D imaging results

图4 FDML LiDAR的系统结构及3D成像实验[41]

Fig.4 Architecture of FDML LiDAR and 3D imaging experiment[41]

为校正系统固有的非线性，FDML输出分为2路：主路用于常规相干探测，校准路与F_{SR} = 50.08 GHz的孤子微梳进行外差拍频；通过希尔伯特变换恢复相位，利用高阶多项式拟合建立精确的频率-时间映射关系。基于该映射对主路时间序列进行重采样，将非线性的正弦扫频等效为理想线性啁啾。校准后，测距信号频谱由展宽的弥散带收敛为清晰的尖锐峰，对应分辨力为55 μm；在8～10 ms时，测量误差不超过±10 nm，在0～8 ms内，测量误差不超过±3.0 nm，Allan方差曲线图如图5所示。实验表明：全时频率校准相较仅以梳齿为离散标定点的方式更具优势，可显著提升测距精度[36, 42]。

典型的FMCW测距实验对比如表1所示。围绕“扫频非线性”这一核心瓶颈，现有解决方案可归纳为两大技术范式：其一为外部参考校准，以微梳作为高稳定的光学频率标尺，对非线性扫频过程进行实时采样与后处理校正。代表性工作包括

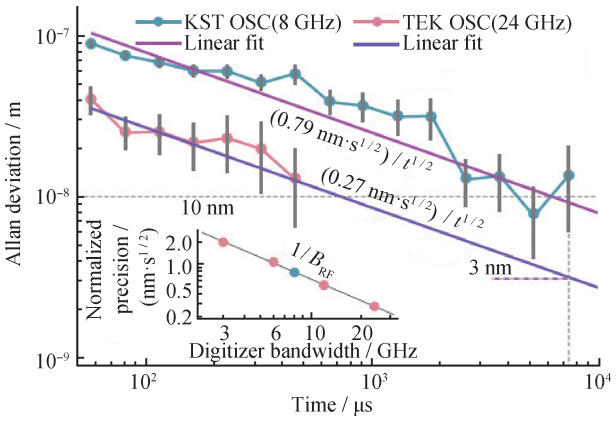


图5　测量距离的艾伦偏差[41]

Fig.5　Allan deviation of the measured distance[41]

JIA L H等人[34]与ZHENG J H等人[35]。

其二为源头抑制，通过开发本征线性调谐特性的激光器，从根源上降低非线性。例如，SNIGIREV V等人[39]借助薄膜$LiNbO_3$的超快电光调谐与自注入锁定显著降低本征非线性，而CAI Z Y等人[41]则通过FDML环路色散匹配获得高线性扫频，再以微梳校正残差，形成2种方法的融合范式。而RIEMENSBER- GER J等人[33]与CHEN J Y等人[40]未采用主动非线性校准，仅依赖激光器扫频的固有线性度，测量精度仅为cm级，受限较为严重。

表1　典型FMCW测距实验对比

Tab.1　Comparison of representative FMCW ranging experiments

核心方法	测距误差	优势	局限	参考文献
以孤子微腔光梳的多个梳齿作为独立的并行FMCW信道，通过衍射光栅进行空间分离，实现大规模并行测距。	1 cm @ 10 m	并行度高，从原理上验证了微腔光梳在并行相干LiDAR中的巨大应用潜力。	未解决扫频非线性问题，测量精度局限于cm级。	[33]
以独立的微腔光梳的稳定FSR作为高精度频率标尺，与主测距信号拍频生成校准峰，通过相位增量拟合校准非线性。	< 20 μm @ 2 m	校准机制精确可靠，有效补偿激光器的非线性、迟滞和随机波动，可移植性较强。	系统复杂度提升，需额外配置校准光路。	[34]
在硅光芯片上，以高Q微腔作为频率参考，扫频产生的透射谱峰作为频率刻度，实现线性化校准，利用EFHN算法处理校准数据。	65 nm @ 4.48 m (室内)；420 nm @ 438 m (户外)	实现了校准单元的片上集成，显著提升系统的集成度和紧凑性，为低成本、小型化FMCW LiDAR提供技术支撑。	算法相对复杂，刷新率受限于校准数据处理效率	[35]
异质集成薄膜$LiNbO_3$调制器于低损耗Si_3N_4波导，利用$LiNbO_3$电光效应，实现超快调谐（10^{15} Hz/s）与窄线宽（3 kHz）片上激光器。		从源头上提升了扫频线性度，可简化甚至省去复杂的非线性校准环节；扫频速度极快，系统响应迅速。	单次带宽受调制/滤波限制；并行化程度有待提升。	[39]
将孤子微梳与片上光学相控阵（Optical Phased Array, OPA）相结合，利用光梳实现多信道并行探测，OPA实现无机械固态光束扫描。	1 cm @ 1.1 m	系统集成度高，实现了光源、并行信道和光束扫描的全固态片上集成。	系统联调较复杂，OPA口径/旁瓣与通道一致性需协同校准。	[40]
以微梳标定FDML激光器（高啁啾速率320 PHz/s）的高阶扫频非线性，全时频率映射重采样实现线性等效。	3.0 nm @ 8 ms	高速高帧率优势显著，FDML链路成熟，微梳刻度提升绝对测量可靠性	系统较复杂，对微梳稳定性要求高；需要高速数据采集和处理能力。	[41]

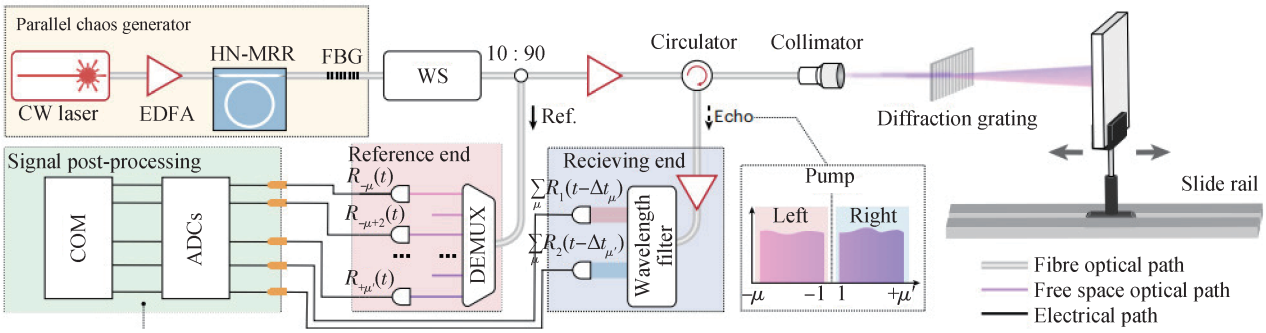
尽管上述FMCW测距技术在并行化、高精度与高速扫描等方面展现出显著优势，但仍存在一定的局限性。首先，无论是引入外部校准光路，还是开发新型的窄线宽超快线性扫描源，均会显著增加系统的复杂度与实现成本，对集成化与商业化应用构成挑战。其次，长期热漂移与环境扰

动会将残余非线性转化为量程依赖性系统误差，锁定环路稳定性与相位噪声问题则制约着系统长期稳定性，该问题在户外远距离场景中更为显著。现有实验多以短距离性能验证为主，长距离实测数据不足，实际应用效能有待进一步验证。

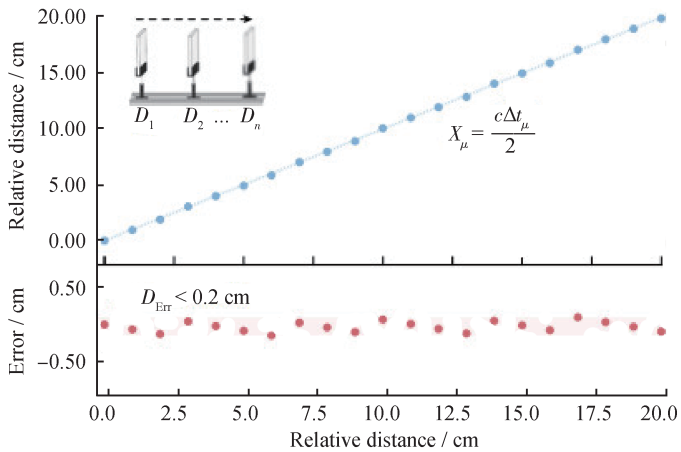
1.2 混沌测距法

在相干测距领域，FMCW通过线性调啾将距离映射为拍频信号，依托高线性扫频与宽带特性，在测量精度与并行探测能力上展现出巨大潜力。然而多套FMCW系统在道路场景并行运行时，信号频谱重叠易引发信道拥塞与串扰，难以区分有效回波[43]，精度明显受限。受码分多址(Code Division Multiple Access，CDMA)[44]的启发，混沌LiDAR应运而生：该技术采用混沌光梳作为宽带、非周期、近白噪声波形，兼具尖锐自相关与极低互相关，可通过互相关将距离直接映射为峰值时间延迟，天然实现“码分式”并行探测，并摆脱对扫频线性的依赖。

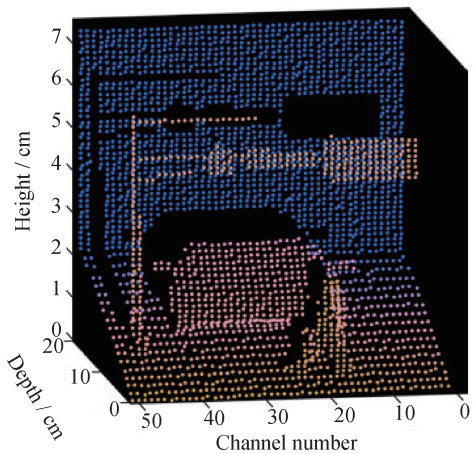
2023年，北京大学王兴军教授团队的CHEN R X等人[45]在铝镓砷与绝缘体(AlGaAs-on-insulator，AlGaAsOI)结合的微腔生成混沌光梳。在相同功率水平下，相较目前应用最广泛的Si_3N_4微梳，AlGaAsOI产生的混沌态的分辨力高出1个数量级；同时，其显著的热光学效应使混沌梳具有超长的存在范围，可作为性能稳定的自由运行光源。实验中，当F_{SR} = 90 GHz与850 GHz时，均获得了超12 GHz带宽的混沌射频谱，并基于此首次实现无干扰、高精度的大规模并行3D LiDAR系统。该系统的核心工作机制为：混沌光梳梳齿经透射光栅在空间展开为多束探测光，各通道距离由互相关峰位置直接解算。研究团队在1 543 ~ 1 558 nm选取泵浦两侧各10条梳齿，构建20个并行探测通道，目标以1 cm步进平移，测距实验装置如图6(a)所示。测试结果表明：所有通道测距误差均不



(a) 测距实验装置
(a) Distance measurement experimental device



(b) 混沌微梳下的距离测量
(b) Distance measurement under chaotic microcon



(c) LiDAR成像框架
(c) LiDAR imaging frame

图6 基于混沌微梳的并行3D激光雷达[45]

Fig.6 Parallel 3D LiDAR based on chaotic microcomb[45]

超过± 2 mm，且无可见串扰，如图6(b)所示。成像采用光栅实现水平方向多束并行探测，配合振镜完成垂直方向线扫描，获得51像素 × 75像素点云，采集速率高达410万像素/秒，成像结果如图6(c)所示。该架构的并行探测能力源于混沌通道的统计正交，因而规避了大规模并行FMCW面临的时间/频率拥塞与线性化难题，为开发兼具高并行度、强抗干扰性与紧凑性的测距系统开辟了新路径。

同年，Kippenberg团队的LUKASHCHUK A等人[46]提出了一种较为简洁的并行混沌LiDAR方案——利用微谐振腔中更为常见且易于激发的调制不稳定(Modulational Instability，MI)态[47]，产生并行混沌光源，省去了传统方案中对电光调制器和微波合成器的依赖。其技术路径为：将泵浦光调谐至Si_3N_4微腔的MI增益区域，系统可直接在腔内激发出间隔约100 GHz的混沌微梳；从中选取40条梳齿作为并行通道，每条通道均具备在射频域超过1 GHz的随机强度/相位噪声带宽，并以互相关运算恢复距离信息。该系统在3D成像中表现出色，能够以40像素×100像素的分辨力，在10 μs的极短采集时间内，达到亚厘米级的测距精度。

此外，该团队进一步将混沌微梳与纯被动色散器件相结合[48]，彻底摒弃了机械扫描部件，构建了并行化、无惯性二维随机调制LiDAR。该系统以运行于MI态的Si_3N_4微环(F_{SR}≈100 GHz)为核心，在1 550 nm波长、900 mW泵浦功率条件下，获得平顶宽带微梳；选取国际电信联盟(International Telecommunication Union，ITU)20 ~ 60号信道(共40通道)，采用虚拟成像相控阵(Virtually Imaged Phased Array，VIPA)实现竖直方向色散、1 200 lines/mm光栅实现水平方向色散，完成纯被动二维空间寻址。系统通过压电器件与微加热器协同作用，以50 Hz频率对梳谱的频率偏置在0 ~ 30 GHz范围内扫描，并由比例积分(Proportional Integral，PI)环路锁定失谐。在2 ~ 3.6 m测距、总泵浦功率≈500 mW、单口收发条件下，0.01 s内即可获得39像素 × 20像素的点云，受VIPA腔多径限制，测距误差不超过± 14 cm。

1.3　色散干涉法

早期研究多采用飞秒OFC进行色散干涉(Dispersive Interferometry，DPI)测距[49-55]，其核心原理是：将目标距离信息编码为信号光与参考光在光谱域干涉后形成的条纹调制频率，通过对干涉谱进行傅里叶变换，即可解析出与往返飞行时延对应的频谱峰值，实现高精度距离解算。DPI系统示意图如图7所示。DPI测距技术凭借长相干长度与高抗干扰容差的特性，适用于远距离精密测量。但同时也存在两大核心瓶颈：其一，低重复频率梳与光谱仪分辨力的不匹配易引发死区效应，导致干涉条纹混叠，造成特定距离测量失效；其二，为规避死区而采用的扫描参考臂、调谐重复率[56]等方法，往往以牺牲系统实时性、稳定性与工程可集成性为代价。

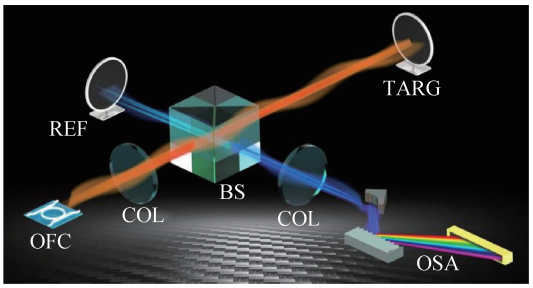


图7　DPI系统示意图[57]

Fig.7　DPI system schematic diagram[57]

针对上述问题，2020年WANG J D等人[57]充分发挥微腔光梳高重复频率的优势，首次实现其在长距离精密色散干涉测距中的应用。为突破传统DPI量程限制，该团队创新地提出了一种混合测量方案，如图8所示。采用辅助双频相位调制激光测距仪完成粗测量，确定无模糊的整数周期距离；利用F_{SR} = 48.97 GHz的孤子微梳(Soliton Microcomb，SMC)构建DPI系统进行精测量，解析该周期内的分数距离，最终成功将无死区量程扩展至约1.5 km。

室内性能验证中，以He-Ne干涉仪为基准参考，在80 m导轨上分别对1 m和80 m处目标进行测量，结果显示：最小Allan偏差分别为2.88 nm(平均测量时间2.74 s)和5.39 nm(平均测量时间2.055 s)，对应的Allan方差曲线如图9所示。

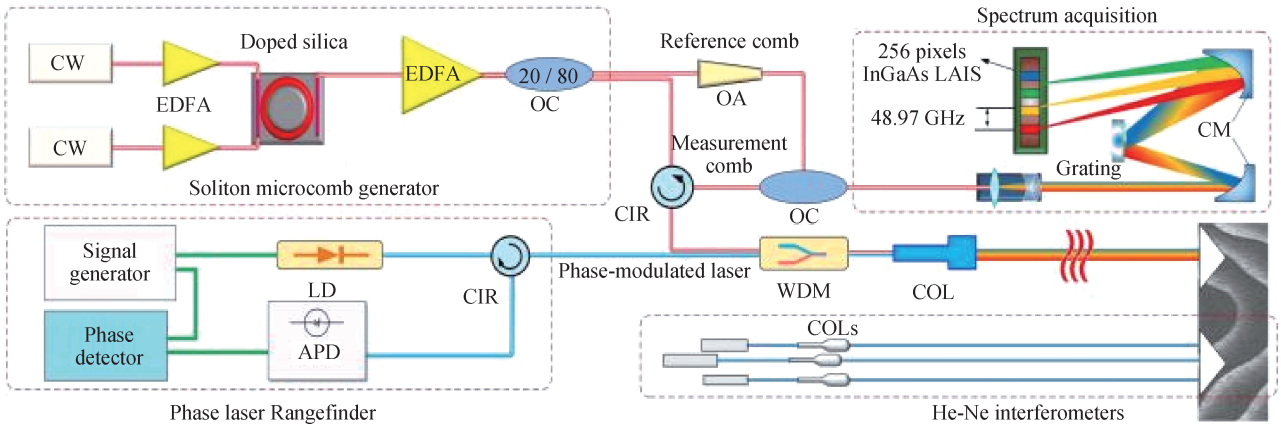


图8 SMC激光雷达原理[57]

Fig.8 Principle of the SMC LiDAR[57]

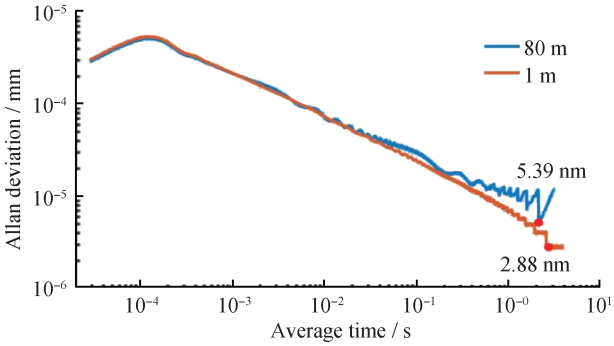


图9 1 m和80 m测距实验的Allan方差[57]

Fig.9 Allan deviations of 1 m and 80 m ranging experiments[57]

该团队在国家计量院1.2 km标准基线上，完成1 179 m室外实测，如图10(a)所示。不同频率振动条件下，测距误差稳定在±2 mm以内，如图10(b)所示。对测距信号施加高通滤波后，Allan偏差在1.8 s处达到最小值27 nm，如图10(c)所示。

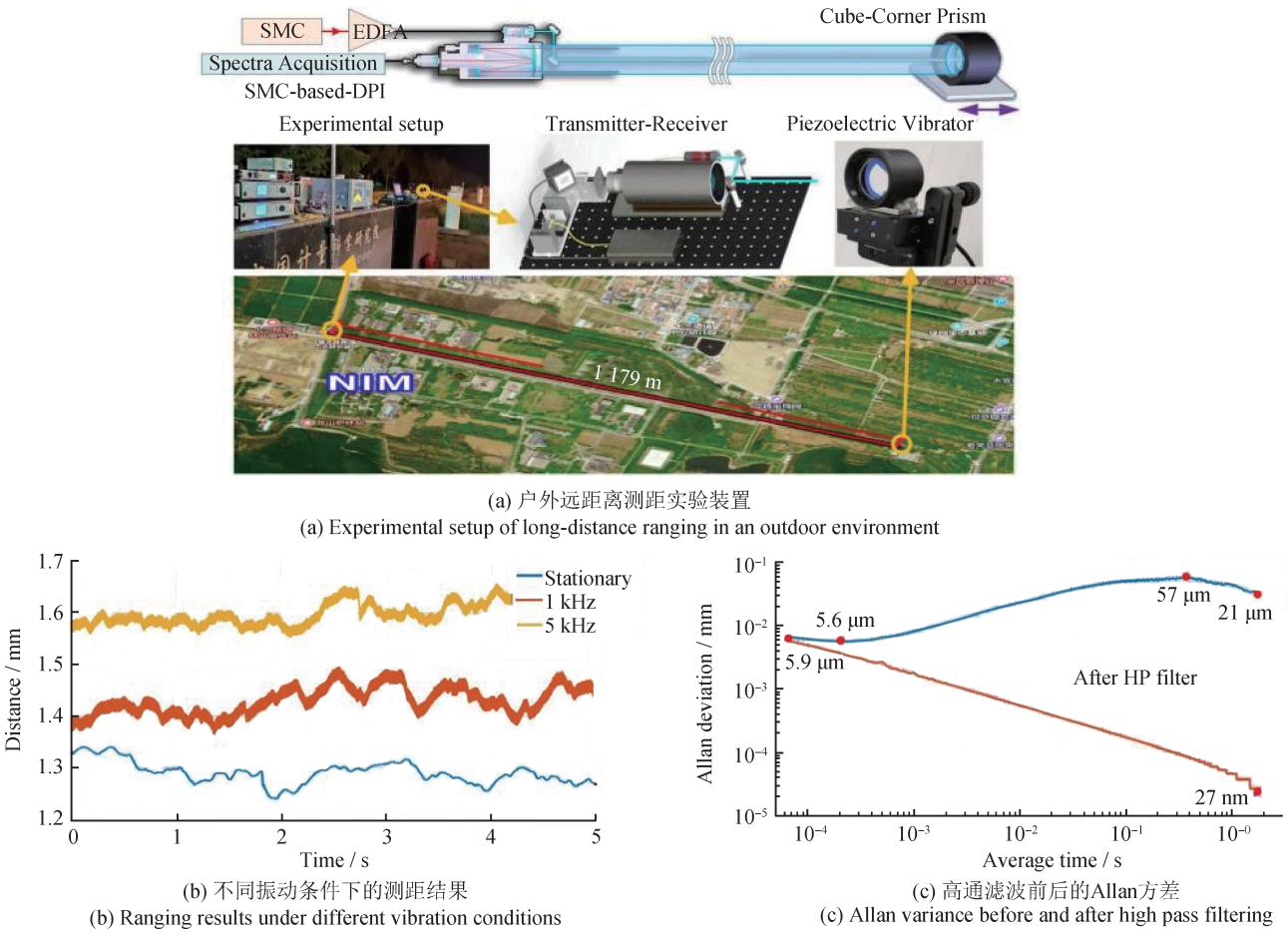
2021年，JANG Y S等人[58]将DPI与零差干涉法(Homodyne Interferometry，HI)融合，仅利用单个孤子微梳与1台光谱分析仪，即可实现系统自洽的测距模糊度解析。该系统采用F_{SR} = 88.5 GHz的Si_3N_4孤子微梳，并引入放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission，ASE)光谱开展DPI测量，将无模糊量程拓展至23.4 mm；同时，从同一干涉信号中直接提取HI信息，即光载波相位，对DPI确定的区间进行纳米级精度的细分测量。该混合架构在0～23 mm的无模糊范围内实现了3 nm的测量重复性，并在白噪声极限下展现出超1 000 s的超长稳定性。

2024年，SHI W Q等人[59]提出一种频率扫描孤子微梳方案，在无需辅助粗测链路的前提下实现扩展色散干涉测距的NAR的有效扩展[60]。通过同步扫泵与微腔以保持失谐恒定，使微梳中心频率在一个FSR内扫描，并在1/2、1/3、1/5、1/7等素数分点各采集1帧干涉谱；对多帧谱经插值等效合成为低重复率梳，再用素数遍历算法唯一确定距离对应的整周数N与时延正负。该过程既放大了原N_{AR}，又缩小了接近$N \times N_{AR}$处的判别盲区。实验采用F_{SR} = 48.97 GHz的单孤子微梳，将N_{AR}扩展了3倍，并在精测中解析出6.859 fs的极小时延，标准差低至1.128 μm。该方法保持了单梳、单谱仪结构，量程提升幅度由所选素数序列决定，具备工程化移植优势。

1.4 合成波长法

合成波长法利用光梳相邻梳齿的频率间隔进行外差拍频，在射频域形成远大于光学波长的等效波长，通过解算其相位获取绝对距离。与色散干涉法相比，该方法凭借连续的相位测量机制，从根本上消除了测量死区，能够在大动态范围内实现连续测距。然而，其性能高度依赖相位与频率间隔的稳定性——来自微腔光梳重复频率的微小抖动都会被显著放大，进而严重影响测量精度。

针对微腔光梳重复频率不稳定的难题，2023年YANG M Y等人[61]首次提出了通过注入锁定重频实现高精度合成波长测距。该团队以外部微波源(溯源至原子钟)驱动电光调制器(Electro Optic



(a) 户外远距离测距实验装置
(a) Experimental setup of long-distance ranging in an outdoor environment

(b) 不同振动条件下的测距结果
(b) Ranging results under different vibration conditions

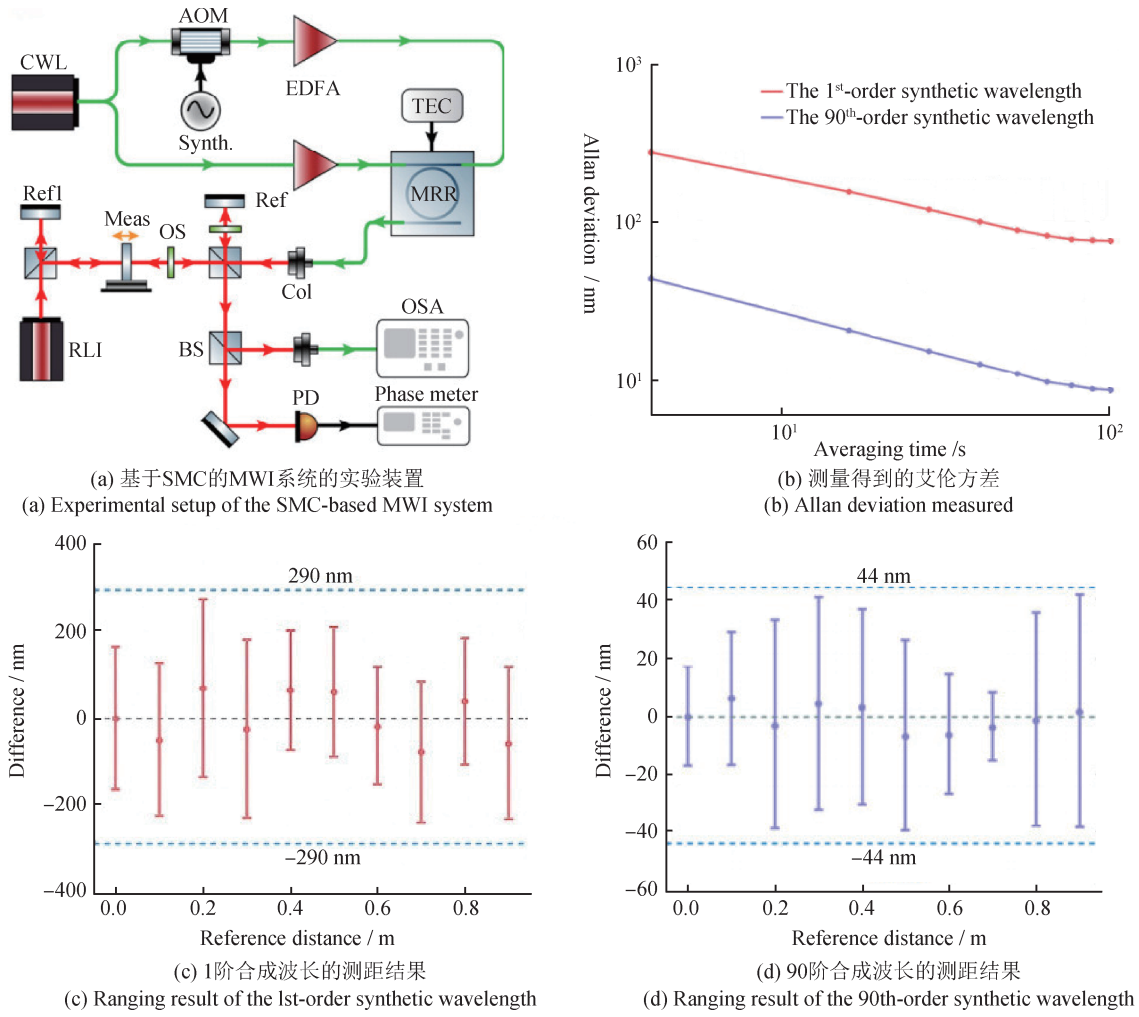
(c) 高通滤波前后的Allan方差
(c) Allan variance before and after high pass filtering

图10　户外测距实验[57]

Fig.10　Outdoor distance measurement experiment[57]

Modulator，EOM)对泵浦光进行强度调制，在载频两侧产生携带微波频率信息的稳定边带，并将该调制光注入腔内，形成以外部微波为基准的能量门控。当边带频率与自由运行重频落入锁定带且调制深度满足阈值条件时，梳齿间隔被牵引并跟随外部微波，实现重频的注入锁定。锁定后，微腔光梳重复频率稳定在48.98 GHz，短时漂移由自由运行的kHz量级降至0.25 Hz，长时测量下的Allan偏差相较于自由运行状态优化了8个数量级以上。基于该光源构建的测距系统，在静态标定实验中，对64 mm位移的残差小于2.7 μm；动态跟踪实验中，成功实现对速度100 mm/s、3 mm幅值的运动目标的精准跟踪；长时稳定性测试中，在0.2 m和1.4 m两个位置、0.05 s的平均测量时间下，最小Allan偏差低至56.2 nm。

2025年，ZHI J W等人[62]提出多波长干涉(Multi-Wavelength Interferometry，MWI)方案，在未经外部锁定的微腔光梳中(F_{SR} ≈ 49 GHz)实现高精度测距，系统结构如图11(a)所示。该系统将光梳分至参考臂和测量臂，两臂光信号干涉形成干涉光谱；除利用相邻梳齿拍频获得基频合成波长外，进一步选取更大间隔的梳齿对，产生一系列谐波拍频，构建由长至短的层级式合成波长，用于精密距离测量。实验结果表明：该系统在0～0.9 m量程内实现了优于44 nm的测量不确定度；稳定性方面，在4、40、100 s的平均测量时间下，Allan偏差分别为43、12、8.6 nm。1阶与90阶合成波长测量的Allan方差如图11(b)所示，对应的测距结果如图11(c)、图11(d)所示。该方案以单一微梳自洽地实现了大非模糊量程与纳米级精度的统一，其结构紧凑、无需第二光源或拍频链路，凸显了微腔光梳在多波长法中的集成化优势。



(a) 基于SMC的MWI系统的实验装置
(a) Experimental setup of the SMC-based MWI system

(b) 测量得到的艾伦方差
(b) Allan deviation measured

(c) 1阶合成波长的测距结果
(c) Ranging result of the lst-order synthetic wavelength

(d) 90阶合成波长的测距结果
(d) Ranging result of the 90th-order synthetic wavelength

图11 MWI测距实验[62]

Fig.11 MWI ranging experiment[62]

2 微腔双光梳测距

2.1 核心技术瓶颈及调控机制

微腔双光梳测距的核心机制是：以2把相干频梳的外差干涉在射频域形成等间隔拍频梳为核心，将目标光路差映射为拍频相位与频率的可观测量，从而实现兼具高刷新率与高精度的距离测量。该类系统的稳定性高度依赖于光梳之间严格的相互相干性，但在实际应用中，相对相位噪声与长时间漂移等因素会破坏这种理想的相干关系，成为制约测距稳定性和精度的核心瓶颈。针对该问题，当前的抑制与补偿方法通常包括两腔独立微梳的相干外差、同一微腔内的反向传播双梳、注入锁定与热控调谐，以及数据域的数字补偿等系统化方案。

相对相位噪声主要源于两微梳在重复频率与载波包络偏置上的瞬时微扰。对于双梳外差而言，任何微小的相位随机起伏被放大并传递至下转换后的射频梳齿上，都将表现为拍频线的展宽与相干时间的缩短，直接降低短时间窗内的相位估计精度与信噪比，该问题在高速测量与并行成像场景中尤为突出。除泵浦本征噪声与链路电子噪声外，微腔内部的热光涨落、孤子自频移及反向散射耦合，均会在两梳间引入差分抖动。因此，抑制相对相位噪声是实现亚微米甚至纳米级测距精度的关键。

工程实践中，相位噪声调控可通过多维度技术实现：通过相干锁定与注入锁定提高互相干度，采用单腔反向传播(Counter Propagating，CP)或共泵浦结构引入共模噪声抵消降低差分相位，并以导

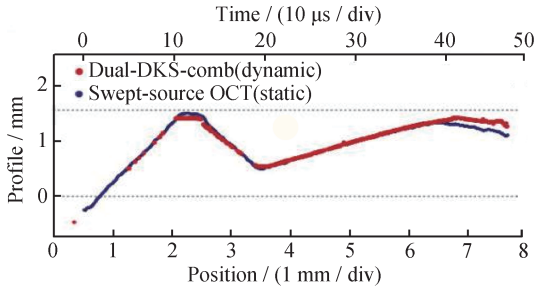
频线辅助的数字重采样技术在信号处理端抑制时间扭曲与残余相位漂移。总体而言，相对相位噪声决定了可实现的拍频线纯度与有效相干积分时长，是制约高帧率与高分辨测距的重要因素。

长时漂移表现为跨秒至小时尺度的缓慢偏移，其来源包括微腔热折射与热膨胀引起的微梳参数滑移、泵源与参考时钟的缓慢漂移、光纤/自由空间链路的环境温度与机械扰动等。与相对相位噪声不同，长时漂移不一定显著展宽瞬时拍频线，但会在平均测量时间增大时转化为量程相关的系统性偏差，限制绝对测距与 N_{AR} 扩展策略的可靠性，该问题在户外与长链路条件下尤为明显。针对此类问题，可通过共参考/共腔结构降低两微梳的差分慢漂，利用外部频率基准与自参考梳稳固关键参数，在数据后处理环节引入周期性校准与漂移补偿算法等。总体而言，长时漂移特性直接决定了系统在复杂环境与长时运行中的基线精度与测量可复现性。

2.2　关键技术进展

2018年，加州理工大学的SUH M G与VAHALA K J开创性地提出了基于芯片孤子微腔光梳的异步双梳测距[63]。该方案采用单个连续波激光器在同一硅微环内泵浦，激发出1对顺/逆时针传播的孤子微梳，并利用声光调制器(Acousto Optic Modulator，AOM)为2路泵浦光引入微小频移，生成2把重频相近但存在微小差异($F_{SR} \approx 9.36$ GHz，重频差 Δf 约为kHz量级)的光梳。实验结果表明：500 ms平均测量时间内，测距误差不超过± 200 nm，最远测量距离25 m，且系统刷新率可达kHz量级，为后续紧凑化高精度双梳LiDAR的研发奠定了基础。

同年，Kippenberg团队的TROCHA P等人[64]利用集成 Si_3N_4 微腔中产生的耗散克尔孤子(Dissipative Kerr Soliton，DKS)光梳，实现了高性能芯片级测距系统。该系统采用1对重频分别为95.842 GHz和95.746 GHz的微腔构建双光梳系统。在平均测量时间13 μs时，系统Allan偏差低至12 nm，信号采集速率高达100 MHz。为验证该系统对高速动态目标的测量能力，该团队对150 m/s高速飞行的子弹轮廓进行测量，并与光学相干断层扫描(Optical Coherence Tomography，OCT)的静态子弹轮廓结果进行对比，如图12所示，2条曲线重合充分验证了该双光梳测距系统在应对高速动态目标时的有效性。



(a) 该方案与OCT的子弹轮廓测量结果
(a) The bullet contour measurement results of the scheme and OCT

(b) 子弹实物图
(b) Physical image of the shell

图12　子弹轮廓测量结果[64]

Fig.12　Shell contour measurement results[64]

2022年，Kippenberg团队的LUKASHCHUK A等人[65]提出了双啁啾微腔光梳的并行相干FMCW测距方案，将双光梳测距的并行化与超高速成像能力提升至新水平。该方案以2把在 Si_3N_4 微环中产生的DKS微腔光梳作为信号梳与本振梳(重频分别为99.39 GHz和98.90 GHz)。通过对2路泵浦光施加同步三角调频，使所有梳齿被赋予线性啁啾。信号梳经966 lines/mm透射光栅实现并行探测，其回波信号与本振梳在单个平衡接收机上完成多外差拍频。得益于2把光梳的重频失配，每个并行通道被映射至互不重叠的射频拍频上，使单个接收机可同时解调所有通道的距离信息，摒弃了对像素/接收阵列和多路数字化系统的依赖。该系统最终实现了64路并行FMCW通道，单通道刷新率达100 kHz，等效像素采集速率高达640万像素/秒。该架构在保留FMCW体制高抗干扰性优势的同时，极大地简化了并行相干LiDAR的硬件复杂度与功耗，为研发视频级帧率的片上集成LiDAR系统提

供了极具前景的技术路径。

针对微腔光梳因重频几乎不可变，而难以兼顾精度与N_{AR}的问题[66]，上海交通大学何广强教授团队的YANG Y C等人[67]于2023年提出了一种温控调谐方案。通过将2个Si_3N_4微环(F_{SR} ≈ 94 GHz)分别置于热电制冷器(Thermoelectric Cooler，TEC)上，使双光梳系统具备动态调整其性能参数的能力。实验结果表明：通过改变工作温度，单梳重频可调范围达0 ~ 12 MHz，两梳重频差可连续由1.84 MHz调至14.58 MHz；在重频差13.59 MHz的条件下，该双光梳测距系统在4 μs测量时间内，测量误差不超过± 32 nm。

2024年，该研究团队进一步提出相干克尔孤子双微梳方案[68]，通过控制梳间中心频率并结合游标Vernier原理扩展了NAR。实验中设置信号梳与本振梳的中心频差约为3 GHz，拍频梳齿间隔约为45.68 MHz，使NAR提升至3.28 m。系统采用2×2光开关在两梳间快速切换，采集2段相干拍频序列，将传统双梳的NAR从mm级扩展到m级，如图13(a)所示。比较原始序列与5倍降采样结果，拍频梳间隔与线宽一致，验证了低采样/低带宽条件下的鲁棒解算，对比结果如图13(b)所示。该方案结合双路平衡拍频，以“中心频差可控、重频差可小”的相干双微梳架构，为工程应用中兼顾长量程、低采集带宽与实时处理现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array，FPGA)/模数转换器(Analog-to-Digital Converter，ADC)提供了可行路径。

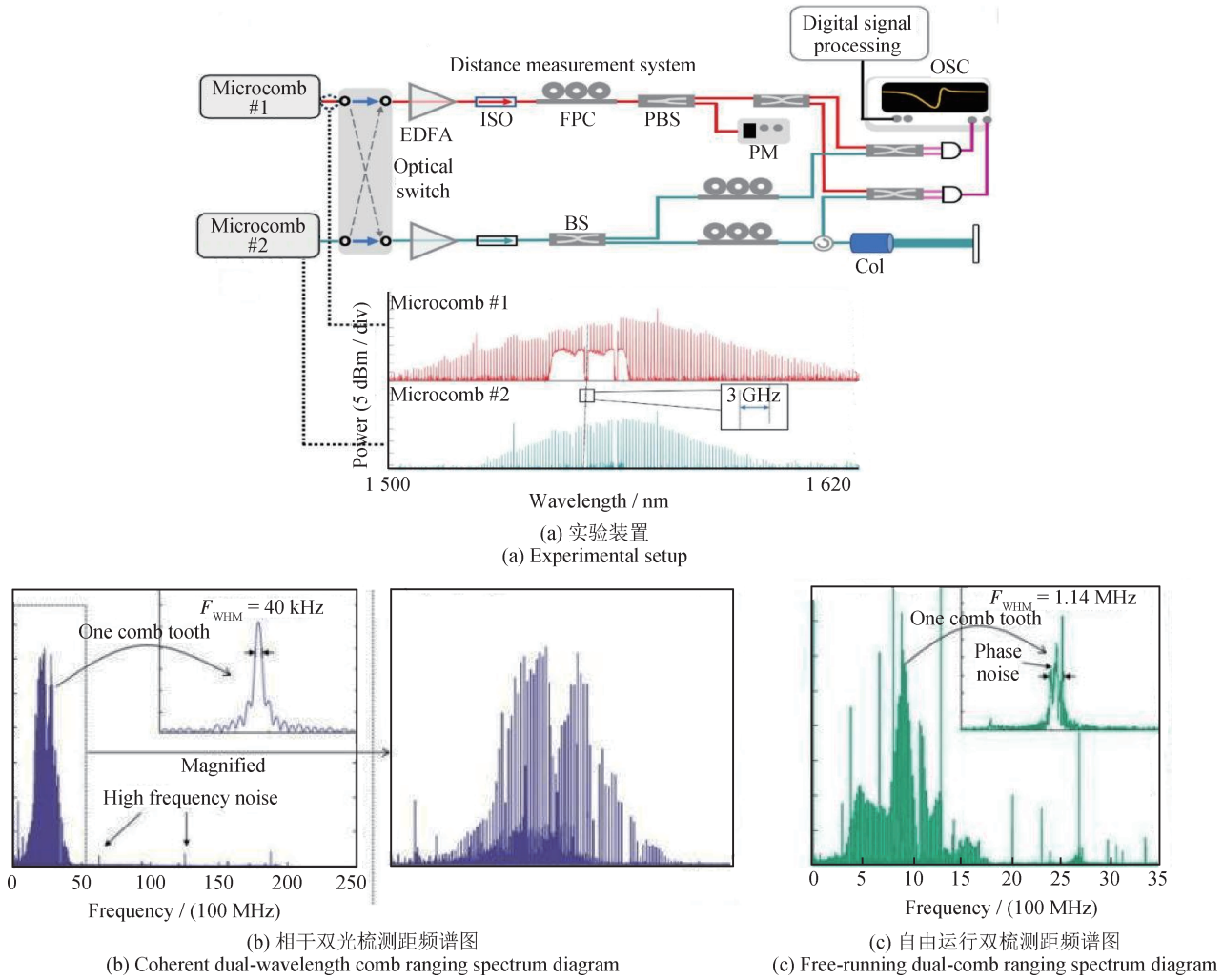


图13 扩大非模糊距离的双梳方案[68]

Fig.13 A dual-comb scheme for extending the NAR[68]

2025年，YAN E Q等人[69]通过对相干双微梳源进行注入锁定，成功解决了自由运行系统的稳定性瓶颈，实现了快速、高精度的测距。该系统将2把Si_3N_4耗散克尔孤子微梳的重频(24.962 02 GHz与24.961 21 GHz)锁定到外部射频参考源，显著提升系统相干性与稳定性。在线性位移实验中，150 ms时间窗内的测量残差小于10 μm；稳定性测试显示：在40 ms平均测量时间下，Allan偏差低至1.6 nm。与自由运行系统相比，该方案显著提高了纳米级测距精度，为未来基于双微梳的高精度LiDAR与遥感应用奠定了基础。

2025年，清华大学鲍成英教授团队的WANG Z H等人[70]将单腔反向传播孤子用于双光梳测距，在单个集成的Si_3N_4微环内同时产生互相干的2把微梳，经外差干涉得到稳定的射频梳，并据此求出距离。系统结构如图14所示，该系统在ms级平均测量时间内实现了1 nm级距离误差、可测量频率高达0.9 MHz的nm级振动。即使在高强度噪声和损耗条件下，极低回波信号也能实现精确的直接相干测距，且每个脉冲的平均接收光子数低至5.5×10^{-4}。

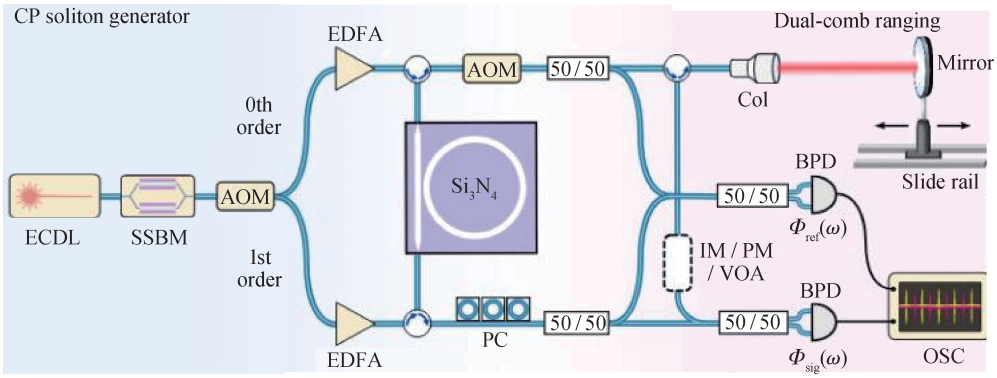


图14　实验装置[70]

Fig.14　Experimental setup[70]

2025年，重庆大学的HUANG J S等人[71]提出基于双光梳呼吸谱的精密LiDAR技术。在泵浦失谐调制下，2把孤子微梳产生沿光频随时间振荡的呼吸干涉条纹；无需时频解调，直接在频域逐齿跟踪呼吸峰位并回溯至稳定梳齿索引，结合高精度拟合与整数周期校核，即可得出绝对距离，且自然扩展NAR而不依赖外置粗测链路。系统采用光栅+线阵电荷耦合元件(Charge Coupled Device，CCD)采集谱线，算法仅含峰值跟踪与线性回归，计算量显著低于传统双梳/色散干涉法。实验结果表明：室内0.5 m量程内，最小Allan偏差为1.08 nm；在217 m户外基线上、0.08 s平均测量时间内，最小Allan偏差为21.8 nm。该方法以频谱峰位跟踪替代时域解调，兼具高稳定度、低算力与CMOS兼容性，在保持片上微梳小型化优势的同时，可实现纳米级短时精度与百米级量程，为单芯片化高精度LiDAR提供了竞争性路线。

典型的微腔双光梳测距实验对比如表2所示。

3　总结与展望

本文系统梳理了微腔光梳测距技术的近年发展历程，其技术演进已从早期原理验证，步入一个由应用需求驱动、不同技术路径呈现功能分化的阶段。单光梳测距技术以相对简洁的系统架构为基础，发展出多样化的实现路径。

FMCW测距依托成熟的相干探测链路与天然的频谱并行性，可实现每秒百万像素的采集速率，在高速3D成像与片上并行扫描中展现突出潜力。但其核心瓶颈仍在于扫频非线性引起的远距离误差。当前主流突破路径分为2类：一类路线以微腔光梳为频率标尺，进行实时校准；另一类则通过$LiNbO_3$等平台的注入锁定、FDML等手段，从源头获得高线性度超快扫频。混沌测距技术则利用宽带与统计正交特性，有效规避频率拥塞与串扰问题，实现强共存和大规模并行，适合车路协同与群体机器人等高并发场景，但精度水平普遍处于

表2 典型微腔双光梳测距实验对比

Tab.2 Comparison of typical dual-microcomb ranging experiments

核心方法	重频差	Allan方差	测距范围	刷新率	相噪抑制技术	参考文献
单腔双向孤子+声光频移异步采样	5.685 kHz	200 nm @ 500 ms	0 ~ 25 m	6 kHz	反向散射光的注入锁定，被动实现相位同步	[63]
双耗散Kerr孤子异步采样	100 MHz	12 nm @ 13 μs		100 MHz	数字信号处理补偿随机相位漂移	[64]
双啁啾微梳+光栅分光并行	490 MHz		0 ~ 25 m	6.4 MPix/s	同源泵浦同步调谐，被动锁定	[65]
热电调谐双微环重频差	13.59 MHz	32 nm @ 4 μs			温控动态调节重频差	[67]
相干孤子双梳+游标原理扩程	45.68 MHz	346 nm @ 9.56 μs	0 ~ 3.28 m	3.3 kHz	共享泵浦固定频差，热调谐匹配微腔	[68]
注入锁定双孤子至射频参考源	806.45 kHz	1.6 nm @ 40 ms	0 ~ 150 mm	> 800 kHz	微波参考源锁定重频	[69]
单腔反向传播孤子双梳	1.62 MHz	1 nm @ ms	0 ~ 13 cm	1.83 MHz	反向散射光的注入锁定，实现相位同步	[70]
双梳呼吸谱峰位跟踪	8 MHz	1.08 nm @ 0.5 m (室内) 21.8 nm @ 217 m (户外)	0 ~ 217 m		呼吸运动平均化相对噪声	[71]

mm至cm量级，需通过码本与解扩协同实现进一步提升。

在长距离、强环境扰动的户外绝对测量等强调鲁棒性与绝对精度的场景下，色散干涉法展现出独特优势，具有高抗干扰性和长时稳定性，但其局限性在于N_{AR}有限、对快速动态目标响应能力不足。而合成波长法在理论上具备无测量死区的连续精密测距能力，适配短距离、高精度、高动态定位，但该技术对重频与相位稳定极为敏感，高阶合成会放大微小抖动，未来需在复杂环境下向单源自参考、片上温控与快速相位跟踪等方向演进，以实现可部署的精密测距。

双光梳测距以2把互相干的微腔光梳实现异步采样，将光学时延高效下变频为射频拍频梳，兼具高刷新率、高精度、长相干与多通道并行的可扩展性。其性能上限由互相干质量所定，关键在于抑制相对相位噪声与长时漂移。该领域的技术路径从依赖独立微腔和精密主动锁相方案，逐步发展为利用共享腔或反向传播结构来引入共模噪声抵消，显著降低相位噪声抑制难度；从受限于近乎固定的重频差，到引入温控调谐重频差与游标Vernier原理等机制来动态优化参数。此外，算法创新也成为性能突破的重要驱动力，如利用呼吸谱在频域进行峰值跟踪替代传统时域解调，显著降低计算复杂度。当前，该技术正逐步向“一体化封装、层级锁定与片上并行处理”的协同设计方向发展，未来有望应用于高速运动目标追踪、大范围高精度遥感、多物理量同步感知等前沿场景。

尽管微腔光梳测距技术路径各异，但仍可归纳出一致的演进规律：

其一，全链条集成化是必然趋势。实现真正意义上的光电全集成——将泵浦源、微腔、光路控制器件、探测器阵列及信号处理单元异质集成于单一芯片封装，构建全固态集成系统是该技术走向广泛应用的必经之路。全集成化也对集成封装工艺、热管理与功耗控制提出了严苛要求：Si_3N_4具有低损耗与高Q值，适用于远距离与高稳定测量；AlGaAsOI非线性系数高、阈值低且易产生宽带色散波，适用于片上多通道与高速并行场

景，但需平衡热稳定与功率密度；薄膜$LiNbO_3$具备Pockels效应，适用于高带宽低半波电压调制与稳频控制，但需关注电极引入损耗与热-电耦合，且仍需深入探索各平台的集成化。

其二，软硬件深度协同与多功能化。几乎所有先进方案都离不开强大的数字信号处理与智能算法，如非均匀重采样、相位解缠等，未来系统性能的突破将越来越依赖于软硬件的深度协同设计。

其三，从外部校准到内建频标的转变。无论是FMCW利用光梳自校准、双光梳采用单腔反向传播结构，还是合成波长法追求片上自参考，本质都是将对复杂外部锁定系统的依赖转化为器件或架构层面的内在稳定性，这是迈向小型化、低成本的关键路径。

其四，可重构与多功能化。微腔光梳本身正朝着高度可编程和多功能化方向发展，根据特定测距场景需求，实时、动态地配置其工作模式和参数，这将极大拓展其在测距及其他感知领域的适应性与效能。发展具有片上动态重频调谐、光谱形状精确整形、孤子态按需切换与稳定控制等能力的芯片，已成为明确趋势，这在可编程OFC的相关研究中得到了初步证实。

未来，跨领域深度融合将为微腔光梳测距技术发展带来新的契机。量子OFC是作为重要研究方向，其通过引入量子噪声压缩态、纠缠光子对等量子光学资源，可突破标准量子极限，实现接近海森堡极限的测量精度。微腔光梳与量子光子学的融合，将进一步突破现有系统性能瓶颈，在极低光功率下实现超高测距精度与灵敏度，为基础科学研究提供全新工具。

可以预见，随着交叉领域的融合与推进，微腔光梳测距技术会进一步拓展面向车载感知、工业计量、空间与对地观测等场景的应用边界，有望发展为变革先进制造与基础科学研究的核心技术，在可部署性、可维护性与规模化上实现真正跃迁。

参考文献

[1] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. Science, 2011, 332(6029): 555-559.

[2] LONG D A, CICH M J, MATHURIN C, et al. Nanosecond time-resolved dual-comb absorption spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2024, 18(2): 127-131.

[3] PICQUE N, HANSCH T W. Frequency comb spectroscopy[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.

[4] HALL J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1279.

[5] HANSCH T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(4): 1297.

[6] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.

[7] SABOL C, BURNS R, MCLAUGHLIN C A. Satellite formation flying design and evolution[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2001, 38(2): 270-278.

[8] BEHROOZPOUR B, SANDBORN P A M, WU M C, et al. LiDAR system architectures and circuits[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10): 135-142.

[9] FORTIER T, BAUMANN E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. Communications Physics, 2019, 2(1): 153.

[10] UDEM T, HOLZWARTH R, HANSCH T W. Optical frequency metrology [J]. Nature, 2002, 416(6877): 233-237.

[11] UDEM T, HOLZWARTH R, HANSCH T W. Femtosecond optical frequency combs[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 172(1): 69-79.

[12] MINOSHIMA K, MATSUMOTO H. High-accuracy measurement of 240 m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512-5517.

[13] KIM S W. Combs rule[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 313-314.

[14] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. Science, 2020, 369(6501): 3676.

[15] KIPPENBERG T J, GAETA A L, LIPSON M, et al. Dissipative kerr solitons in optical microresonators[J]. Science, 2018, 361(6402): 8083.

[16] DEL'HAYE P, SCHLIESSER A, ARCIZET O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. Nature, 2007, 450(7173): 1214-1217.

[17] GRUDININ I S, YU N, MALEKI L. Generation of optical frequency combs with a CaF_2 resonator[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 878-880.

[18] PAPP S B, DIDDAMS S A. Spectral and temporal characterization of a fused-quartz-microresonator optical frequency comb[J]. Physical Review A, 2011, 84(5): 053833.

[19] OKAWACHI Y, SAHA K, LEVY J S, et al. Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3398-3400.

[20] LI J, LEE H, CHEN T, et al. Low-pump-power, low-phase-noise, and microwave to millimeter-wave repetition rate operation in microcombs[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(23): 233901.

[21] JUNG H, XIONG C, FONG K Y, et al. Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2810-2813.

[22] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature Photonics, 2014, 8(2): 145-152.

[23] YANG Q F, YI X, YANG K Y, et al. Counter-propagating solitons in microresonators[J]. Nature Photonics, 2017, 11(9): 560-564.

[24] LIU H, HUANG S W, WANG W, et al. Stimulated generation of deterministic platicon frequency microcombs[J]. Photonics Research, 2022, 10(8): 1877.

[25] HE Y, LOPEZ-RIOS R, JAVID U A, et al. High-speed tunable microwave-rate soliton microcomb[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 3467.

[26] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.

[27] CODDINGTON I, Newbury N R, SWANN W C. Dual-comb spectroscopy[J]. Optica, 2016, 3(4): 414-426.

[28] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications[J]. Nature, 2017, 546(7657): 274-279.

[29] MAZUR M, SUH M G, FULOP A, et al. High spectral efficiency coherent superchannel transmission with soliton microcombs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4367-4373.

[30] CHANG L, LIU S T, BOWERS J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 95-108.

[31] JIA K P, CAI Y C, YI X W, et al. Low-noise frequency synthesis and terahertz wireless communication driven by compact turnkey Kerr combs[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 6253.

[32] JIN X, XIE Z Y, ZHANG X P, et al. Microresonator-referenced soliton microcombs with zeptosecond-level timing noise[J]. Nature Photonics, 2025, 19(6): 630-636.

[33] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. Nature, 2020, 581(7807): 164-170.

[34] JIA L H, WANG Y, WANG X Y, et al. Nonlinear calibration of frequency modulated continuous wave LiDAR based on a microresonator soliton comb[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1025-1028.

[35] ZHENG J H, JIA L H, ZHAI Y R, et al. High-precision silicon-integrated frequency-modulated continuous wave LiDAR calibrated using a microresonator[J]. ACS Photonics, 2022, 9(8): 2783-2791.

[36] JIN W, YANG Q F, CHANG L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using cmos-ready ultra-high-Q microresonators[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 346-353.

[37] LI B H, JIN W, WU L, et al. Reaching fiber-laser coherence in integrated photonics[J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5201-5204.

[38] MARTIN A, DODANE D, LEVIANDIER L, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent lidar[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4640-4645.

[39] SNIGIREV V, RIEDHAUSER A, LIHACHEV G, et al. Ultrafast tunable lasers using lithium niobate integrated photonics[J]. Nature, 2023, 615(7952): 411-417.

[40] CHEN J Y, LI W L, KANG Z, et al. Single soliton microcomb combined with optical phased array for parallel FMCW LiDAR[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 1056.

[41] CAI Z Y, WANG Z H, WEI Z Q, et al. A microcomb-em-

powered Fourier domain mode-locked LiDAR[J]. Science Advances, 2025, 11(6): 9590.

[42] DEL'HAYE P, ARCIZET O, GORODETSKY M L, et al. Frequency comb assisted diode laser spectroscopy for measurement of microcavity dispersion [J]. Nature Photonics, 2009, 3(9): 529-533.

[43] HWANG I P, LEE C H. Mutual interferences of a true-random lidar with other lidar signals [J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 124123-124133.

[44] ABU-RGHEFF M A. Introduction to CDMA wireless communications[M]. New York: Academic Press, 2007.

[45] CHEN R X, SHU H W, SHEN B T, et al. Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos[J]. Nature Photonics, 2023, 17(4): 306-314.

[46] LUKASHCHUK A, RIEMENSBERGER J, TUSNIN A, et al. Chaotic microcomb-based parallel ranging[J]. Nature Photonics, 2023, 17(9): 814-821.

[47] MATSKO A B, LIANG W, SAVCHENKOV A A, et al. Chaotic dynamics of frequency combs generated with continuously pumped nonlinear microresonators [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 525-527.

[48] LUKASHCHUK A, RIEMENSBERGER J, STROGANOV A, et al. Chaotic microcomb inertia-free parallel ranging[J]. APL Photonics, 2023, 8(5): 056102.

[49] JOO K N, KIM S W. Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 5954-5960.

[50] JOO K N, KIM S W. Refractive index measurement by spectrally resolved interferometry using a femtosecond pulse laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 647-649.

[51] JOO K N, KIM Y, KIM S W. Distance measurements by combined method based on a femtosecond pulse laser[J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19799-19806.

[52] GODBOUT M, DESCHENES J D, GENEST J. Spectrally resolved laser ranging with frequency combs [J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15981-15989.

[53] CUI M, ZEITOUNY M G, BHATTACHARYA N, et al. Long distance measurement with femtosecond pulses using a dispersive interferometer[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6549-6562.

[54] YAN X, ZHOU W H, LIU D M, et al. Absolute distance measurement by spectrally resolved interferometry based on a femtosecond pulse laser [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 081509.

[55] VANDENBERG S A, VANELDIK S, BHATTACHARYA N. Mode-resolved frequency comb interferometry for high-accuracy long distance measurement [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 14661.

[56] WU H Z, ZHANG F M, MENG F, et al. Absolute distance measurement in a comded-dispersive interferometer using a femtosecond pulse laser[J]. Measurement Science Technology, 2016, 27(1): 015202.

[57] WANG J D, LU Z Z, WANG W Q, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb[J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1964.

[58] JANG Y S, LIU H, YANG J H, et al. Nanometric precision distance metrology via hybrid spectrally resolved and homodyne interferometry in a single soliton frequency microcomb [J]. Physical Review Letters, 2021, 126(2): 023903.

[59] SHI W Q, WANG Y, WANG W Q, et al. Non-ambiguous range extension by a frequency scanning soliton microcomb[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(20): 7253-7259.

[60] WANG J D, QU X, ZHANG F M, et al. Review of dispersive interferometry ranging with optical frequency comb and the instrumentation prospect[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2020, 11437(1): 114370A.

[61] YANG M Y, WANG G C, WANG Z C, et al. Micrometer-precision absolute distance measurement with a repetition-rate-locked soliton microcomb[J]. Optics Letters, 2023, 48(16): 4356-4359.

[62] ZHI J W, GUO X Y, JIN J H, et al. Precise distance measurement by multi-wavelength interferometry using a soliton microcomb [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(7): 377-380.

[63] SUH M G, VAHALA K J. Soliton microcomb range measurement[J]. Science, 2018, 359(6378): 884-887.

[64] TROCHA P, KARPOV M, GANIN D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs [J]. Science, 2018, 359(6378): 887-891.

[65] LUKASHCHUK A, RIEMENSBERGER J, KARPOV M, et al. Dual chirped microcomb based parallel ranging at

megapixel-line rates[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3280.

[66] MARTIN B, FENEYROU P, DOLFI D, et al. Performance and limitations of dual-comb based ranging systems [J]. Optics Express, 2022, 30(3): 4005-4016.

[67] YANG Y C, ZHOU K L, HU C H, et al. Dual-comb ranging using soliton microcombs with tunable repetition rate [C]// Conference on Lasers and Electro-Optics, 2023.

[68] YANG Y C, SHEN Y, ZHOU K L, et al. Optical ranging using coherent Kerr soliton dual - microcombs with extended ambiguity distance[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(16): 5450-5457.

[69] YAN E Q, WANG G C, LEI X Y, et al. Rapid and high-precise ranging with a frequency-locked and coherent dual-microcomb source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(11): 5202-5208.

[70] WANG Z H, WANG Y F, SHI B Q, et al. Nanometric dual-comb ranging using photon-level microcavity solitons [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 6853.

[71] HUANG J S, WANG J D, WANG Y, et al. Precision LiDAR using dual-comb breathing spectra[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(21): e00169.

（本文编辑：刘宇轩）

第一作者：黄博航(2003—)，男，博士研究生，主要研究方向为微腔光频梳。

通信作者：武腾飞(1983—)，男，研究员，博士，主要研究方向为超快激光精密测量。

通信作者：何广强(1977—)，男，上海交通大学集成电路学院信息与电子工程学院光子传输与通信全国重点实验室教授，博士生导师，主要研究方向为微腔光频梳、量子光频梳。在Photonics Research、ACS Photonics、Physical Review A/B/Applied、OL/OE、Nanophotonics等期刊上发表期刊论文90余篇，授权专利及软件著作权30余项。主持多项国家自然科学基金项目、国家高技术研究发展计划等。