

文章编号: 1672-8785(2025)03-0042-05

自由运转双光梳高精度测距技术

陈清翔 宁 焱 邓博文 杨 馥*

(东华大学物理学院, 上海 201600)

摘 要: 双光梳测距系统因测量速度快、测距精度高等特性在远距离高精度测量领域显现了巨大潜力。通常情况下, 需用复杂的硬件锁定双光梳系统以保证系统的稳定性。这给双光梳系统的实际应用带来负面影响。因此, 将自由运转双光梳系统作为光源, 利用软件校正算法(主要是互模糊函数)来提取目标的距离, 大大简化了实验系统的复杂度。实验结果表明, 当目标距离约为 1 m、激光重复频率约为 100 MHz、双梳重频差约为 774 Hz 时, 自由运转下双光梳系统的单次测距精度约为 3.56 μm , 且测量结果具有较好的线性度。本研究为双光梳系统的实际外场应用积累了一定的基础。

关键词: 双光梳测距; 自由运转; 互模糊函数; 测距精度

中图分类号: TN24 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.006

Free-Running Dual-Comb High-Precision Ranging Technology

CHEN Qing-xiang, NING Yan, DENG Bo-wen, YANG Fu*

(College of Physics, Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract: The dual-comb ranging system has shown great potential in the field of long-distance and high-precision measurement due to its fast measurement speed and high ranging accuracy. Usually, the complex hardware is required to lock the dual-comb system to ensure the stability of the system. This has a negative impact on the practical application of the dual-comb system. Therefore, the free-running dual-comb system is used as the light source, and the software correction algorithms (mainly the cross-ambiguity function) are used to extract the distance of the target, which greatly simplifies the complexity of the experimental system. The experimental results show that when the target distance is about 1 m, the laser repetition frequency is about 100 MHz, and the repetition frequency difference between the combs is about 774 Hz, the single-shot ranging accuracy of the free-running dual-comb system is about 3.56 μm , and the measurement results have good linearity. This study has accumulated a certain foundation for the practical field application of the dual-comb system.

Key words: dual-comb ranging; free-running; cross-ambiguity function; ranging accuracy

收稿日期: 2025-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62375048); 上海市自然科学基金项目(22ZR1402600)

作者简介: 陈清翔(2004-), 男, 福建人, 本科生, 主要从事自由运转双光梳应用系统方面的研究。

*通讯作者: E-mail: fuyang@dhu.edu.cn

0 引言

快速、实时、高精度的距离测量在科学研究、先进设备制造和太空探索等领域具有重要应用。目前的高精度测距技术一般要求在目标距离达数百米时实现微米级精度^[1-2]。飞秒光梳凭借其宽光谱、窄脉宽、高重频稳定性等特性,为高精度测距提供了一条新技术路径。在众多光梳测距系统中,双光梳测距(Dual-Comb Ranging, DCR)系统因其快速测量、高精度以及大探测范围等优势备受关注。该系统基于一对脉冲重复频率存在微小差异的锁模光频梳,通过光学采样原理自动实现距离解算,避免了传统机械或电子扫描装置的对准需求,显著简化了系统结构^[3-4]。

当前研究主要聚焦于硬件优化以提升 DCR 系统的性能,例如改进锁相模块或光路设计^[3-4],但这类方案往往导致系统的复杂性和成本大幅增加。因此,本文提出一种基于互模糊函数的软件校正算法,从信号处理层面突破硬件限制,旨在解决自由运转双光梳系统的同步误差问题。

1 原理

1.1 DCR 测量模型

基于飞行时间算法的 DCR 系统的结构原

理图如图 1 所示^[6]。其中,BS1 和 BS2 为分束镜,PD 为探测器,BPF 为光学带通滤波器(Band-Pass Filter, BPF),LPF 为电学低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF),ADC 为模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC),Processing 为信号处理模块,REF 为参考反射器,TARGET 为目标反射器。

LO(频率 f_{r1})和 SIG(频率 f_{r2})为两套自由运转光频率梳(Optical Frequency Comb, OFC)。SIG 的输出光被分束器 BS1 分为两路:一路入射至参考反射器 REF,另一路射向目标反射器 TARGET。两路反射光经 BS1 合束后,与 LO 的光脉冲序列在时域上交叠干涉,生成两组互相关干涉图(Interferogram, IGM)。其中,参考干涉图 I_R 由 REF 反射光与 LO 的反射光干涉产生;目标干涉图 I_M 由 TARGET 反射光与 LO 的反射光干涉产生。通过测量同一周期内 I_R 与 I_M 的时间间隔 Δt ,可解算目标镜与参考镜的绝对距离 D :

$$D = 2(L - L_0) \quad (1)$$

式中, L_0 为参考基准距离, L 为目标距离。

信号处理与降噪机制如下:光路中引入 BPF,以避免光频梳高阶模式与射频梳齿“混淆”,确保单根射频梳齿唯一对应一个光频模式。电学 LPF 则依据奈奎斯特采样定理滤除

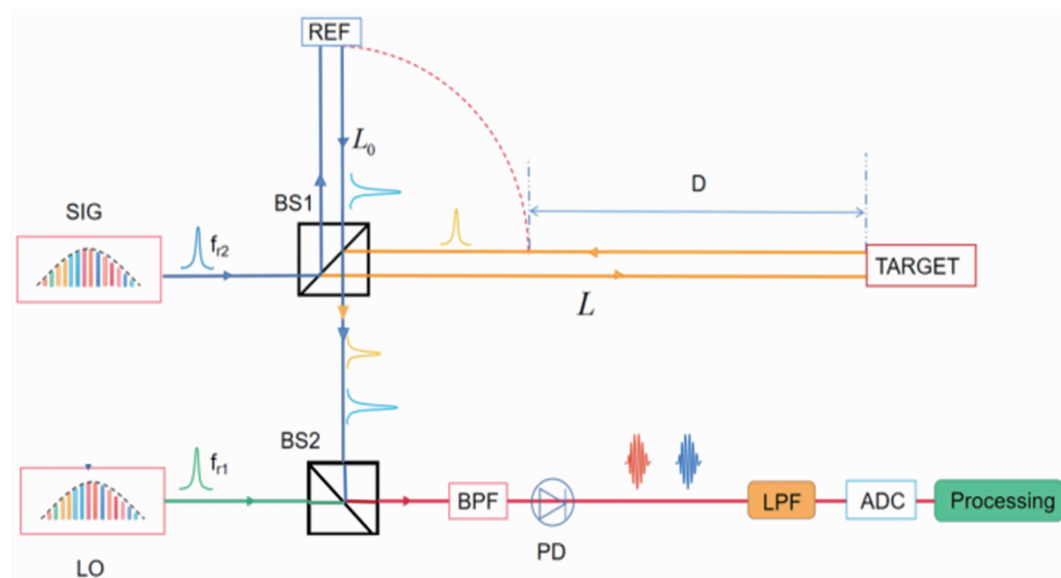


图 1 双光梳测距原理图^[6]

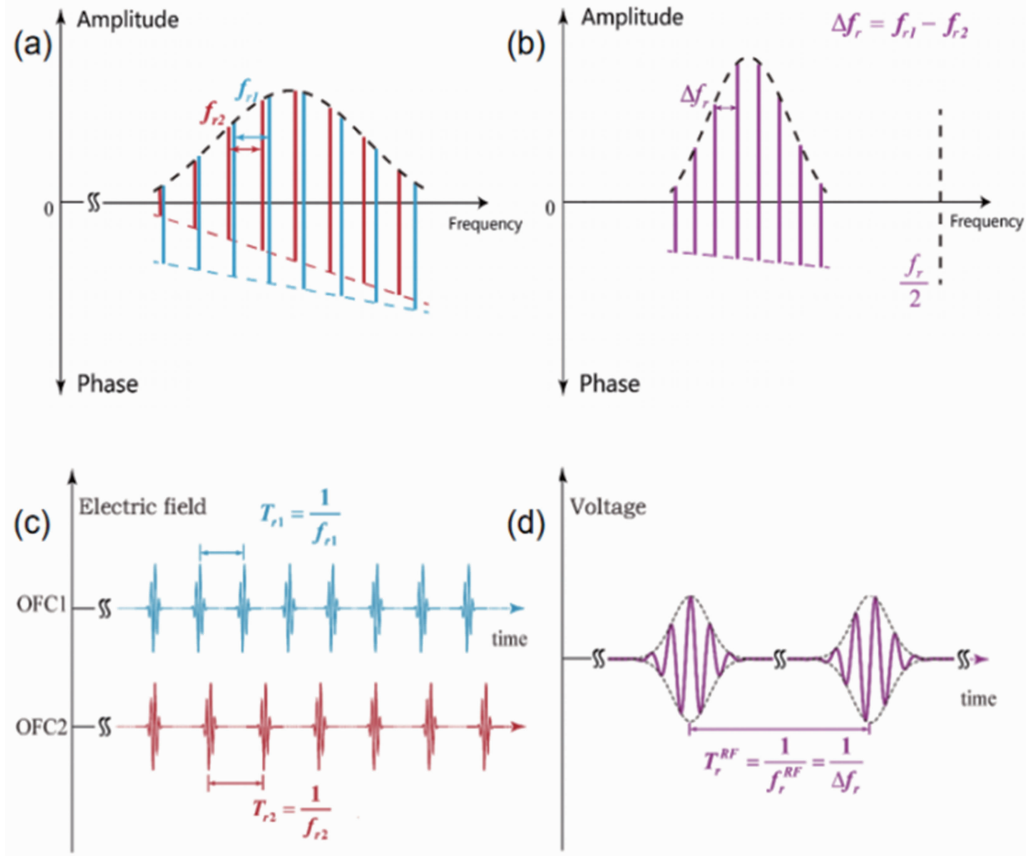


图 2 双光梳干涉原理图：(a)光频域信号；(b)射频域信号；(c)光频域时域信号；(d)拍频时域信号^[6]

高于脉冲重复频率半值 $f_r/2$ 的高频成分，抑制混叠噪声。光电探测器将干涉光信号转换为电信号后，ADC 完成数字化采样，最终由计算机对采样数据进行解调、相位提取和距离解算，从而实现高精度绝对距离测量。

在时域中，光频梳输出一系列脉冲长度在亚皮秒量级的周期性脉冲。在频域中，光频梳是一系列具有相等空间（脉冲重复率）的频率梳，其频谱宽度可达到太赫兹量级。如果将两个重复频率相差不大的 OFC 混合，那么就会出现多外差相干探测。如图 2(b)所示，通过采用截止频率为脉冲重复率一半的 LPF，两个 OFC 梳状器只与最近的梳状器发生拍频。这样就可以在射频域中再现光频域特性。如图 2(b)所示，这意味着在频域中存在一系列射频梳状体，其空间 $\Delta f_r = f_{r1} - f_{r2}$ (假设 $f_{r1} > f_{r2}$) 相等。从时域来看，如图 2(c)和图 2(d)所示，两个 OFC 通过异步光学采样混合产生一个多外差 IGM，异步光学采样可将时间间隔放大

$f_{r1}/\Delta f_{r2}$ 倍。这对高精度距离探测很有吸引力^[7]。

基于飞行时间 (Time of Flight, TOF)^[8] 方法的 DCR 系统的目标距离 D 可以通过计算得到：

$$D = \frac{c \Delta \tau \Delta f_r}{2 n_g f_{r1}} \quad (2)$$

式中， c 为光速， n_g 为群折射率， $\Delta \tau$ 为参考 IGM 与信号 IGM 之间的时间延迟。

距离的相对不确定度 U_D/D 可以表示为^[9]

$$\begin{aligned} \frac{U_D}{D} &= \sqrt{\left[\frac{\partial(\ln D)}{\partial \Delta \tau} \right]^2 u_{\Delta \tau}^2 + \left[\frac{\partial(\ln D)}{\partial \Delta f_r} \right]^2 u_{\Delta f_r}^2 + \left[\frac{\partial(\ln D)}{\partial f_{r1}} \right]^2 u_{f_{r1}}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta \tau}}{\Delta \tau} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta f_r}}{\Delta f_r} \right)^2 + \left(\frac{u_{f_{r1}}}{f_{r1}} \right)^2} \\ &\approx \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta \tau}}{\Delta \tau} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta f_r}}{\Delta f_r} \right)^2 + \left(\frac{u_{f_{r1}}}{f_{r1}} \right)^2} \quad (3) \end{aligned}$$

由式(3)可知，测距精度由三项决定：第一项是由时间延迟的判定误差引起的；第二项是由

两个光梳之间的脉冲重复频率差的误差引起的; 第三项是由梳齿一的脉冲重复频率误差引起的。由于 f_{r1} 远大于 Δf_r , 与第二项相比, 第三项的影响被忽略。这意味着测距精度的提高主要取决于对时间延迟和脉冲重复频率差的准确估计。

1.2 校正原理

互模糊函数^[5]是一种相关函数的变种, 用于计算两个相似波形的时间延迟和频率偏移, 其表达式为

$$\chi_{1,k}((k), f_{ceo}(k)) = \int_{-\infty}^{\infty} A_1(t) A_{(K)}(t + \tau) \exp(2\pi i f_{ceo}(k)t) dt \quad (3)$$

式中, $A_1(t)$ 和 $A_{(K)}(t)$ 为待计算的两个波形; $*$ 表示复共轭; f_{ceo} 和 τ 表示待检索的频率偏移和时间延迟。依次将截取的 IGM 的中心峰值区代入函数, 当 $|\chi_{1,k}(\tau(k), f_{ceo}(k))|$ 取得最大值时即可检索出其相对的载波频率偏移 f_{ceo} 和时间延迟序列 τ 。本文将原始信号分为参考路和信号路, 分别将其代入互模糊函数, 然后通过计算求出时间延迟序列 $\tau_{ref}(k)$ 和 $\tau_{sig}(k)$, 从而得到 $\Delta\tau(k) = \tau_{ref}(k) - \tau_{sig}(k)$ 。

众所周知, 锁模激光器 DCR 系统产生的 IGM 是周期性脉冲信号, 两个参考 IGM 之间

的周期 T_{ref} 可通过时间延迟作差得到: $T_{ref}(k) = \tau_{ref}(k+1) - \tau_{ref}(k)$ 。因此, 重复频率差可以表示为 $\Delta f_r(k) = 1/T_{ref}(k)$ 。将时间延迟 $\Delta\tau(k)$ 和重复频率 $\Delta f_r(k)$ 代入式(1), 可得到待测距离。

2 实验验证

基于图 1 所示的系统, 当重复频率约为 100 MHz、重频差约为 774 Hz、目标距离约为 1 m、示波器采样率为 500 MHz 且两个光梳独立自由运转时, 30 组原始 IGM 和校正后的 IGM 叠加于同一窗口的效果图如图 3 所示。

由图 3(a)可知, 当 30 组 IGM 信号叠加在同一窗口时, IGM 信号有显著的漂移。这给 IGM 峰值信号提取带来了较大的误差。产生此现象的原因是系统处于自由运转状态, 载波包络频移、重频差均存在随机抖动。当采用互模糊函数校正后, 如图 3(b)所示, IGM 信号的一致性大大提升, 为距离的精确测量提供了保障。

在实验中, 采用可变延迟线 (Variable Delay Line, VDL) 来调整目标距离。VDL 的设置值从 20 mm 到 29 mm, 步长为 1 mm。按照本文的软件校正算法, 处理结果如表 1 和图 4 所示。

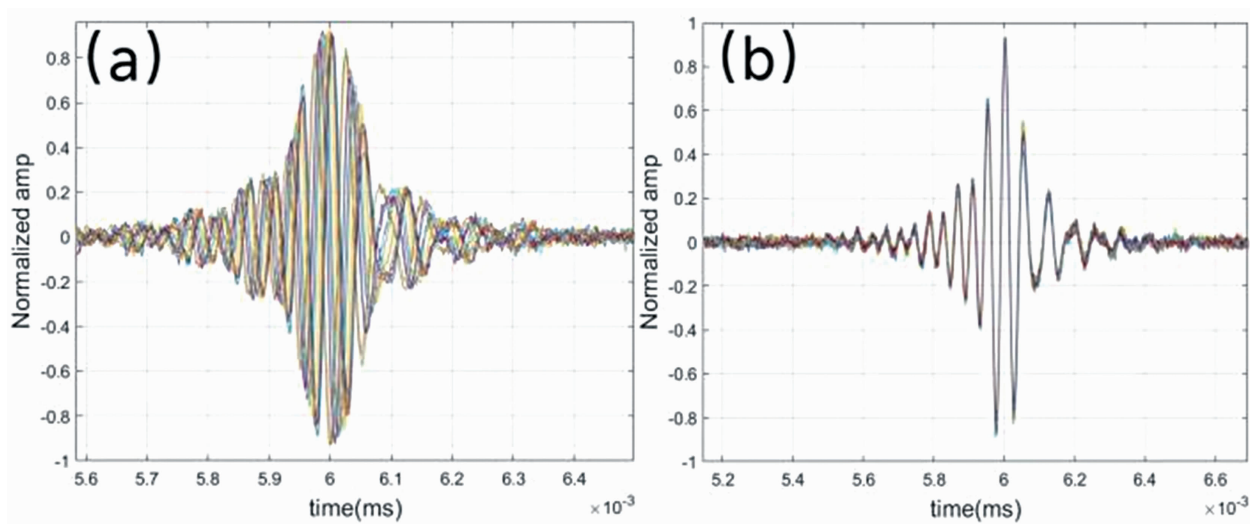


图 3 IGM 叠加于同一窗口的效果图: (a)原始 IGM; (b)校正后的 IGM

表 1 测量结果

VDL 值/mm	平均值/m	方差/m
20	0.2268	3.82×10^{-6}
21	0.2277	4.13×10^{-6}
22	0.2287	3.10×10^{-6}
23	0.2297	4.87×10^{-6}
24	0.2308	4.55×10^{-6}
25	0.2317	1.88×10^{-6}
26	0.2327	2.96×10^{-6}
27	0.2337	3.67×10^{-6}
28	0.2347	2.48×10^{-6}
29	0.2357	4.10×10^{-6}

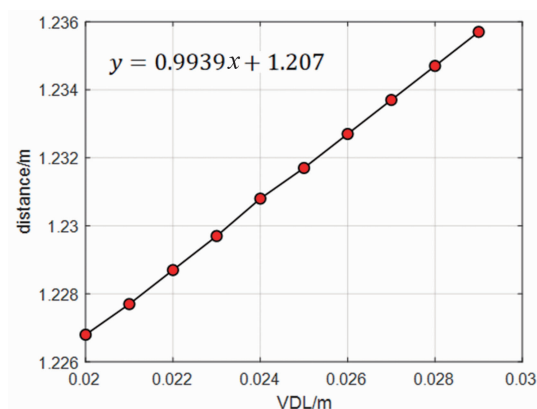


图 4 测量平均值与 VDL 之间的关系

由表 1 可得, 利用互模糊函数校正后的测量标准差约为 $3.56 \mu\text{m}$, 即单次测量的精度为 $3.56 \mu\text{m}$ 。图 4 中的拟合曲线表明, 测量结果与 VDL 设置值之间的关系是线性的, 拟合曲线斜率为 0.9939。拟合曲线斜率的理论值应为 1, 实际值与 1 的偏差可能是由于实验过程中 VDL 的距离通过手动调整, 存在一定的误差。

3 结束语

本文基于互模糊函数算法提出了一种用于自由运转双光梳测距系统的软件自校正方法。实验结果表明, 利用互模糊函数可有效提取重频差抖动及校正载波包络频移, 在硬件系统自由运转状态下单次测量时可实现微米量级的精度, 累积情况下的测量精度也得到了进一步提高。本文研究为双光梳系统应用于外场环境提

供了一条新途径。

同时, 互模糊函数也可应用于双光梳光谱系统的校正与测量。未来, 在系统层面上, 可将实验系统及算法进行集成, 通过优化算法和并行计算架构来提升系统处理效率; 在应用层面上, 可将本系统应用于百米级测距及多维度空间同步测量。

参考文献

- [1] Rakich A, Dettmann L, Leveque S, et al. A 3-D Metrology System for the GMT [C]. *SPIE*, 2016, **9906**: 990614.
- [2] Tan J B, Jiang Z D, Luo J B, et al. Accuracy Measurement Theory and Method for High-end Precision Equipment [J]. *Bulletin of Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 955-962.
- [3] Jia L H, Zheng J H, Zhang F M, et al. Research Progress of High Precision Ranging Technology Based on Optical Frequency Comb [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, **59**(20): 244-260.
- [4] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用 [J]. *中国激光*, 2021, **48**(15): 1504002.
- [5] Hébert N B, Genest J, Deschênes J D, et al. Self-corrected Chip-based Dual-comb Spectrometer [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(7): 8168-8179.
- [6] 程楚玉. 双光梳测距系统测距性能仿真分析及其实验研究 [D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [7] Yu H Y, Kai N, Zhou Q L, et al. Digital Error Correction of Dual-comb Interferometer Without External Optical Referencing Information [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(20): 29424-29437.
- [8] Wu H, Zhang F, Meng F, et al. Absolute Distance Measurement Using Frequency Comb and a Single-Frequency Laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(24): 2587-2590.
- [9] Zhu Z B, Wu G H. Dual-Comb Ranging [J]. *Engineering*, 2018, **4**(6): 772-778.