

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.03.08

双光梳绝对距离测量实验研究

武腾飞, 韩继博, 白毓, 邢帅, 张磊

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 长度测量作为几何量测量关键共性基础技术之一, 在科学研究、高端装备制造及空间探测等领域有着重要的应用。双光梳绝对测距技术充分发挥了光学频率梳的时域超短脉冲和频域高分辨特性, 实现了高测量速率的绝对距离测量。目前双光梳测距存在测量范围小、测量精度低的问题, 为解决此问题, 提出了一种基于双光梳测距技术与相位测距技术相结合的方案, 采用双光梳测距技术实现非模糊距离范围内长度的高精度测量, 利用相位测距技术实现非模糊距离整数倍测量及指示功能, 作为双光梳测距高精度测量的有效补充。搭建实验系统对该方案的可行性进行验证, 结果表明在 0~70 m 的测量范围内, 测量误差小于 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

关键词: 双光梳; 绝对距离; 大尺寸测距

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)03-0050-06

Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb

WU Tengfei, HAN Jibo, BAI Yu, XING Shuai, ZHANG Lei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China)

Abstract: Length measurement, one of the key generic and basic technologies of geometric measurement, has important applications in scientific research, high-end equipment manufacturing and space exploration. The dual optical comb absolute distance measurement technology makes the best of the characteristics of the optical frequency comb in time domain ultra-short pulse and frequency domain high-resolution. Further it achieves absolute distance measurement with high measurement rate. Until now, the problems of limited measurement range and low measurement accuracy ail the community of double optical comb ranging. To relieve it, this work presents a novel technological solution, which combines the double optical comb ranging and phase ranging. The double optical comb ranging technology is adopted to realize the high-precision measurement of the length within the non-fuzzy range. The phase ranging technology is used to measure and indicate the integer multiple of the non-fuzzy range, which is an effective complement to the high-precision measurement of double optical comb ranging. An experimental system is built to verify the feasibility of the proposed technological solution, and the results show that the measurement error is less than $\pm 5 \mu\text{m}$ within the measurement range of 0~70 m.

Key words: double optical comb; absolute distance; large scale ranging

0 引言

长度的精密计量在科学与工业领域扮演着重

要角色^[1-2]。基于激光的测距方法可以获得极高的精度、空间分辨力及更远的测程, 广泛应用于大型装备制造领域^[3-5]。21世纪以来, 精密工业制

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-25

基金项目: 航空科学基金(2018ZD44003)

引用格式: 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (3): 50-55.

Citation: WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (3): 50-55.



造、大型飞机数字化装配、空间探测技术的快速发展对绝对距离测量的精度和范围提出了更高的要求^[6-9]。许多大尺寸精密测量任务，如大型工件内外径测量、大型通信天线定位、大型机身机翼对接以及空间卫星编队控制等，需要在几百米或更远的测量范围内实现亚微米甚至纳米级误差的绝对距离测量，这是传统激光测量方法难以实现的^[10-13]，而基于飞秒激光频率梳的绝对距离测量技术具有测量精度高、测量范围广的优点，有望满足上述领域应用需求。

2002年，德国的Schiller提出了双光梳测量技术，2009年美国国家标准技术研究院首先将该技术应用于绝对测距^[14]。2014年，哈尔滨工业大学的谭久彬、杨睿韬团队提出了基于双激光频率梳的多波长干涉测距方法^[15]。之后，清华大学、天津大学、中国计量院、华东师范大学也纷纷推动相关研究^[16-18]。

目前，国内外双飞秒激光频率梳测距系统的测量范围大多在100 m以内，测量重复性为亚微米级，测量误差为微米级。针对双光梳测距系统非模糊距离范围有限、大尺寸绝对测距过程复杂等问题，采用一种基于双光梳测距技术与相位测距技术相结合的方案，实现了双光梳大尺寸高精度绝对距离测量。本文对该方案的基本原理进行详细介绍，并搭建了测距实验系统，对该方案的可行性与有效性进行验证。

1 双光梳绝对测距基本原理

双光梳时域扫描测距原理如图1所示，信号光脉冲的重复频率为 f_r ，扫描光脉冲的重复频率为 $f_r - \Delta f$ ，信号光脉冲经过分束镜分为两束，分别入射至参考镜和测量目标靶镜，获得参考脉冲和测量脉冲。在时域上，信号光脉冲的脉冲间隔为 $1/f_r$ ，扫描光脉冲的脉冲间隔为 $1/(f_r - \Delta f)$ 。由于二者之间存在微小的重复频率差值 Δf ，故对应的信号光脉冲与扫描光具有一定的时间间隔，相当于扫描光脉冲以时间间隔 $\Delta T = 1/(f_r - \Delta f) - 1/f_r$ 扫过参考脉冲和测量脉冲，从而完成时域光学扫描。参考信号与测量信号时间差的精确测量需要通过倍频技术结合峰值探测手段实现。使用倍频晶体，使参考光脉冲与扫描光脉冲产生一束倍频光，作为参考

信号；测量光脉冲与扫描光脉冲产生另一束倍频光，作为测量信号。

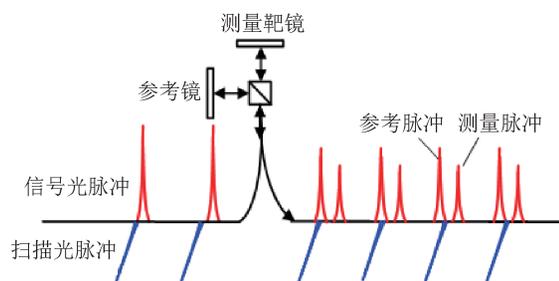


图1 双光梳时域扫描测距原理

Fig.1 Principle of time domain scanning and ranging with double optical comb

双梳测距信号如图2所示，通过精确定位参考信号 t_{ref1} 及测量信号 t_{tar} 脉冲对的峰值位置，即可得到相邻脉冲的时间间隔 τ_d 。

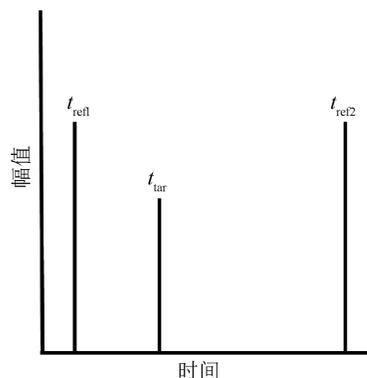


图2 双光梳测距信号

Fig.2 Double optical comb ranging signal

τ_d 的计算公式为

$$\tau_d = \frac{t_{tar} - t_{ref1}}{(t_{ref2} - t_{ref1}) \cdot f_r} \quad (1)$$

式中： t_{tar} 为等效测量信号的飞行时间； t_{ref1} 为等效参考信号； t_{ref2} 为下一个参考信号； f_r 为信号激光器的重复频率。 $t_{ref2} - t_{ref1}$ 为测量信号的周期，可以表示为 $\frac{1}{\Delta f}$ ， Δf 为信号激光器与本地激光器之间的重复频率差。等效信号的飞行时间差为

$$\tau_d = \frac{t_{tar} - t_{ref1}}{1/\Delta f} \cdot \frac{1}{f_r} = \frac{\Delta f}{f_r} \cdot (t_{tar} - t_{ref1}) \quad (2)$$

由上述测量原理可知，该方法的有效测量范围（非模糊距离）为 $\frac{c}{2n_g f_r}$ ，其中， c 为真空中光

速, 299762458 m/s; n_g 为空气折射率, 可根据环境参数计算得出。

由信号激光器的重复频率决定。若要拓展测量范围, 实现超过非模糊距离范围的绝对距离测量, 需要改变激光器的重复频率再进行一次测量, 通过对同一距离进行两次测量才能得到绝对距离^[19]。本文提出的基于双光梳测距技术与相位测距技术相结合的方案中, 采用相位测距技术的粗测指示模块测得的距离为 L_0 (误差一般为毫米量级), 对 $L_0/(c/2n_g f_r)$ 向下取整得到整数 N 。总的待测距离 L 为

$$L = N \cdot \frac{c}{2n_g} \cdot \frac{1}{f_r} + \frac{c}{2n_g} \cdot \tau_d \quad (3)$$

令

$$\Delta t = t_{tar} - t_{ref1} \quad (4)$$

则待测的总距离 L 可以表示为

$$L = \frac{c}{2n_g f_r} (N + \Delta f \cdot \Delta t) \quad (5)$$

2 双光梳绝对测距实验系统

双光梳绝对测距系统装置图3所示, 光学频率梳1发出信号光脉冲, 光学频率梳2发出扫描光脉

冲, 光学频率梳1与光学频率梳2的偏移频率和重复频率通过频率锁定系统锁定到铷原子钟上, 中心波长均为1560 nm。其中, 信号光脉冲经过二分之一波片(HWP)后, 在偏振分光棱镜(PBS)处分为两束偏振态互相垂直的脉冲光, 一束作为参考光脉冲, 经四分之一波片(QWP)后入射至反射镜; 另一束作为测量光脉冲, 经四分之一波片、扩束镜和双色镜(DM)入射至被测目标。两束反射回光在偏振分光棱镜处汇合, 经二分之一波片, 入射至另一偏振分光棱镜。扫描光脉冲经过二分之一波片后, 与参考光脉冲和测量光脉冲在偏振分光棱镜处汇合, 经凸透镜(L)汇聚后, 入射至二类匹配PPKTP倍频晶体, PPKTP晶体末端镀有1560 nm反射780 nm增透膜, 该膜的作用是进行光学滤波, 以输出纯净的光学测距信号。光学测距信号由光电探测器接收, 转换为电信号并送入数据采集与处理系统, 得到等效飞行时间 Δt 。粗测指示模块发出中心波长为650 nm的粗测指示光, 经双色镜反射与飞秒测量光脉冲共路传输, 保证测量路径一致, 获得粗测距离值, 从而计算得出整数 N 。

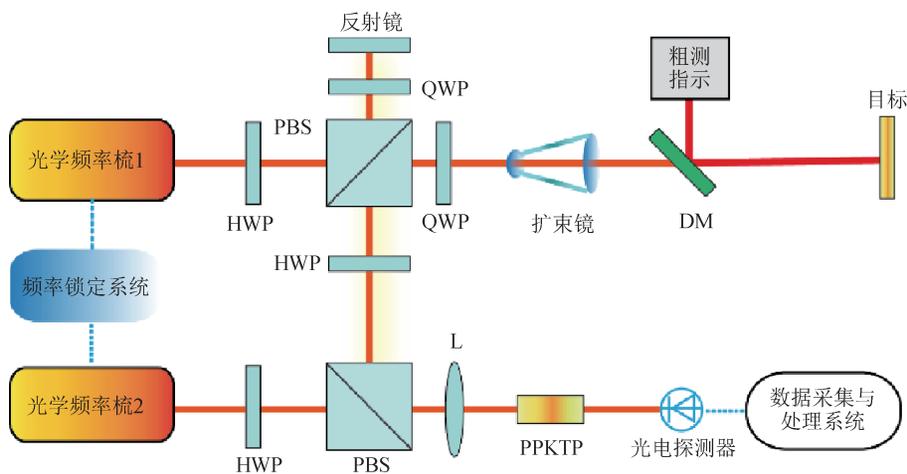


图3 双光梳绝对测距系统

Fig.3 Double optical comb absolute ranging system

光学频率梳1和光学频率梳2的重复频率锁定值分别为100.097621 MHz和100.095621 MHz, 则重频差 $\Delta f=2$ kHz。

将 Δf , Δt , n_g , N , f_r , c 代入式(5), 即可计算得到绝对距离。

3 实验结果

根据式(5)可知, 对于本测量系统, 测量不确定度来源: 信号激光器重复频率 f_r 引入的不确定度分量、信号激光器与本地激光器之间的重频差

Δf 引入的不确定度分量、空气折射率 n_g 引入的不确定度分量、等效信号的飞行时间差 Δt 引入的不确定度分量。因此，双光梳绝对测距系统的标准不确定度的计算式为

$$u_i^2 = \left(\frac{\partial L}{\partial n_g}\right)^2 u_{n_g}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial f_r}\right)^2 u_{f_r}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta f}\right)^2 u_{\Delta f}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta t}\right)^2 u_{\Delta t}^2 \quad (6)$$

根据式(6)计算出扩展不确定度的结果为 $U=0.8 \mu\text{m}+2.8 \times 10^{-7}L$ ($k=2$)，其中， L 的单位为 m 。

为验证本测距装置的性能及不确定度评定的准确性，利用本装置与中国计量院80 m大长度激光比长国家标准装置进行测量比对实验。飞秒激光测距装置放置在仪器架上，与激光干涉仪共同放置在导轨的起始端，测量目标放置在气浮平台上。首先，调整飞秒激光测距装置发射激光的光轴与导轨的机械轴、激光干涉仪的光轴平行。之后将气浮平台移动至飞秒激光测距仪的发射光出口，设置该位置为初始位置，将飞秒激光测距仪与激光干涉仪测量距离初始化为0。然后移动气浮平台，每隔约9 m测量一次，直至导轨的远端。

本测距系统激光的中心波长 λ 为 $1.560 \mu\text{m}$ ，测量环境参数：温度 t 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ （即 $T=293.15 \text{ K}$ ），压强 p 为 1013.25 hPa ， CO_2 含量 x 为 0.0375% ，相对湿度 R 为 50% 。水汽压由修正的Tetens公式计算得出，饱和水汽压 E 为 23.370 ，水汽压 e 为 11.685 hPa ，计算可得标准大气环境下折射率 n_{sg} 为 1.000289635 ，实际大气环境下折射率 n_g 为 1.000269426 。

空气折射率采用国际大地测量协会（IAG）公布的Rueger公式组进行计算。在指定标准大气环境下，温度 T 为 273.15 K ，大气压强 p 为 1013.25 hPa ， CO_2 含量 x 为 0.0375% ，水汽压 e 为 0.0 hPa ，大气群折射率计算公式为

$$(n_{sg} - 1) \times 10^6 = 287.6155 + \frac{4.88660}{\lambda^2} + \frac{0.06800}{\lambda^4} \quad (7)$$

式中： λ 为光学波长， μm 。故实际大气群折射率为

$$(n_g - 1) \times 10^6 = \left(\frac{273.15}{1013.25} \cdot \frac{P}{T} \cdot (n_{sg} - 1) \times 10^6\right) - 11.27 \frac{e}{T} \quad (8)$$

验证测量结果是否在不确定度范围内准确一致，即验证两个不同测量结果之间的计量兼容性。判别条件为

$$|y - y_{\text{ref}}| \leq \sqrt{U^2 + U_{\text{ref}}^2} \quad (9)$$

式中： y 为双飞秒激光测距装置的测量结果； y_{ref} 为计量院标准装置的测量结果； U 为双飞秒激光测距装置的测量不确定度； U_{ref} 为计量院标准装置的测量不确定度。

中国计量院室内80 m大长度激光比长国家标准装置测量不确定度 $U_{\text{ref}}=(0.1+0.1 \times L) \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。

表1为双光梳绝对测距系统与中国计量院激光比长标准装置比对实验结果及分析。

表1 测量结果分析

Tab.1 Analysis of measurement results

距离 /m	$ y - y_{\text{ref}} $ / μm	U_{ref} / μm	U / μm	$\sqrt{U^2 + U_{\text{ref}}^2}$ / μm	是否满足 $ y - y_{\text{ref}} \leq \sqrt{U^2 + U_{\text{ref}}^2}$
3.0	1.8	0.25	1.6	1.6	满足
12.0	1.5	1.3	4.2	4.4	满足
21.0	0.3	2.2	6.7	7.1	满足
30.0	0.7	3.1	9.2	9.7	满足
39.0	4.7	4.0	11.7	12.4	满足
48.0	4.0	4.9	14.2	15.0	满足
57.0	0.2	5.8	16.8	17.8	满足
69.0	3.6	7.0	20.1	21.3	满足

表1中双光梳绝对测距装置测量结果为测量时间100 ms下的平均值。由表1与激光比长标准装置测量结果可知，在0~70 m的测量范围内，测量误差小于 $\pm 5 \mu\text{m}$ ；经实验验证该系统的测量距离可达到130 m以上，验证了所采用方案的有效性以及实验系统的可靠性。

4 结论

双光梳绝对测距技术，具有测量精度高，速度快，无测量死区等优点，为双光梳系统工程化提供了理论及实验支撑，可以解决传统激光测距方法中不能同时实现高精度与绝对距离测量的矛盾，在大尺寸计量校准、远距离测绘及大型装备制造等领域具有广阔应用前景。本文采用基于双光梳测距技术与相位测距技术相结合的方案搭建了双光梳绝对测距系统，利用该系统与激光比长标准装置进行测距比对实验，结果证明了该方案的准确性与有效性。本文所做研究作为双光梳

绝对测距系统走出实验室、走向实际应用奠定了一定基础；但在系统工程化、小型化等方面，需要开展进一步探究，后续将继续对该系统进行优化。

参考文献

- [1] 程楚玉, 杨馥, 刘政, 等. 双光梳测距系统测距精度仿真模拟[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 72-79.
CHENG C Y, YANG F, LIU Z, et al. Simulation of ranging precision based on dual comb ranging system[J]. Infrared and laser engineering, 2020, 49(S2): 72-79. (in Chinese)
- [2] 张涛. 基于相移法的飞秒脉冲激光绝对距离测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
ZHANG T. Research of phase-shift absolute distance measurement by use of femtosecond laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [3] 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): 250-267.
WU G H, ZHOU S Y, YANG Y T, et al. Dual-comb ranging and its applications [J]. Chinese journal of lasers, 2021, 48(15): 250-267. (in Chinese)
- [4] 张天宇, 曲兴华, 张福民, 等. 基于扫频采样的飞秒激光大尺寸测距方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2708-2712.
ZHANG T Y, QU X H, ZHANG F M, et al. Study on the large-scale distance measurement method for femtosecond laser based on frequency scanning and optical sampling[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2019, 39(9): 2708-2712. (in Chinese)
- [5] 秦鹏, 王思佳. 基于光学频率梳的高精度距离测量研究进展(特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 42-48.
QIN P, WANG S J. Progress in high-precision distance measurement based on optical frequency combs (Invited) [J]. Electro-optic technology application, 2021, 36(5): 42-48. (in Chinese)
- [6] 李跃鹏. 基于全保偏飞秒光纤激光器的双光梳绝对距离测量系统[D]. 天津: 天津大学, 2019.
LI Y P. Dual-comb absolute distance measurement system based on all polarization-maintaining femtosecond fiber lasers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [7] 杨军, 张力, 李新良. 动态计量技术发展中的几个关键问题[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 8-21.
YANG J, ZHANG L, LI X L. Several primary problems in the development of dynamic metrology [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(2): 8-21. (in Chinese)
- [8] 许健. 双光梳多波长干涉测距信号采集与相位解算技术研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2021.
XU J. Research on the signal acquisition and phase solution for dual-comb multi-wavelength interferometric laser ranging[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [9] 夏文泽, 刘洋, 赫明钊, 等. 双光梳非线性异步光学采样测距中关键参数的数值分析[J]. 物理学报, 2021, 70(18): 180601.
XIA W Z, LIU Y, HAO M Z, et al. Numerical analyses of key parameters of nonlinear asynchronous optical sampling using dual-comb system [J]. Acta physica sinica, 2021, 70(18): 180601. (in Chinese)
- [10] 吕林杰, 武腾飞, 韩继博, 等. 瞬态高速光子多普勒测速技术研究现状及展望[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 64-72.
LV L J, WU T F, HAN J B, et al. Research status and prospect of transient high speed photon doppler velocimetry [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(2): 64-72. (in Chinese)
- [11] 林百科, 曹士英, 袁小迪, 等. 赫兹相对线宽的双光梳绝对距离系统[J]. 计量科学与技术, 2021(2): 44-48.
LIN B K, CAO S Y, YUAN X D, et al. Dual-comb absolute distance measurement system with Hz relative linewidth [J]. Metrology science and technology, 2021(2): 44-48. (in Chinese)
- [12] 崔佳华. 基于窄线宽激光器锁定的双光梳系统及其测距应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
CUI J H. Research on dual comb system based on locking to narrow linewidth lasers and their ranging application [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [13] 娄志峰, 耿万佳, 张记云, 等. 被动式激光跟踪测量方法及其误差补偿技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 34-41.
LOU Z F, GENG W J, ZHANG J Y, et al. Passive laser tracking measurement method and error compensation technology [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 34-41. (in Chinese)
- [14] 武子铃. 双光梳非合作目标绝对距离测量的研究[D].

- 天津: 天津大学, 2019.
- WU Z L. Research on the absolute distance measurement of a non-cooperative target by dual-comb [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [15] 夏清鹰, 钟学敏, 任培武, 等. 基于激光测距的飞机着陆滑行灯靶板自动化校准系统[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 41-47.
- XIA Q Y, ZHONG X M, REN P W, et al. Automatic calibration system for the target board of aircraft landing taxi light based on laser ranging[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 41-47. (in Chinese)
- [16] 李岩, 张弘元. 双光频梳非线性异步光学采样绝对距离测量[J]. 计量学报, 2014, 35(S1): 6-10.
- LI Y, ZHANG H Y. Absolute distance measurement by dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling [J]. Acta metrological sinica, 2014, 35(S1): 6-10. (in Chinese)
- [17] 李建双. 室内 80 m 大长度激光比长国家标准装置的研制[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- LI J S. Development of indoor 80 m large-scale laser comparator national standard [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [18] 许立明. 基于FPGA的飞秒激光飞行时间测距仪中高速信号处理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- XU L M. The research of high-speed signal processing in the time-of-flight rangefinder of femtosecond laser based on FPGA [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [19] 李雯靓. 基于锁模激光器异步光学采样绝对测距研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- LI W L. Absolute ranging of asynchronous optical sampling based on mode-locked laser [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 武腾飞(1983-), 男, 研究员, 博士, 主要从事飞秒激光频率梳、飞秒激光几何量测量、激光光谱测量等研究。