

基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法

张晓声 易旺民 胡明皓 杨再华 吴冠豪

Large-scale absolute distance measurement using inter-mode beat of a femtosecond laser

Zhang Xiao-Sheng Yi Wang-Min Hu Ming-Hao Yang Zai-Hua Wu Guan-Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 080602 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.080602

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080602>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二次偏振调制测距系统中调制频率与测距精度的关系

Relationship between modulation frequency and range accuracy in the double polarization modulation range finding system

物理学报.2016, 65(10): 100601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.100601>

光学频率梳啁啾干涉实现绝对距离测量

Absolute distance ranging by means of chirped pulse interferometry

物理学报.2016, 65(2): 020601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020601>

光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量

Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb

物理学报.2015, 64(2): 020601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020601>

基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现

Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation

物理学报.2014, 63(10): 100602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100602>

一种光学频率梳绝对测距的新方法

A new method of measuring absolute distance by using optical frequency comb

物理学报.2014, 63(10): 100601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100601>

基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法*

张晓声¹⁾ 易旺民²⁾ 胡明皓¹⁾ 杨再华²⁾ 吴冠豪^{1)†}

1) (清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

2) (北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

(2015年12月14日收到; 2016年1月7日收到修改稿)

本文基于飞秒激光模间拍频法实现多波长相位式绝对距离测量, 通过改变光频梳重复频率合成波长扩大测距量程, 并采用监测臂和双快门切换系统补偿和消除由电路产生的相位差单向漂移和大幅抖动. 实验中以20倍重复频率的拍频进行测量, 在30 min内相位测量的标准偏差为 0.022° ; 与双频激光干涉仪比对1125 mm行程内位移测量结果, 测距精度优于 $50\text{ }\mu\text{m}$; 实验验证了合成波长方法扩大量程方案的可行性, 获得的测距重复性优于 $3\text{ }\mu\text{m}$, 该系统理论上可扩展量程至7.5 km.

关键词: 模间拍频法, 飞秒激光, 大尺寸测距

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.65.080602

1 引言

长度量是科学和工程中最常用的物理量, 也是国际单位制的基本物理量之一, 目标物与参考点之间的绝对距离即是一种典型的长度量. 高精度绝对距离测量在科学研究和工程应用中具有重要意义, 随着科学技术的发展, 各种场合对测距的量程、精度、速度等指标都出现了更高的要求, 在航天器定位、卫星编队、大地测绘、大型土木工程测量、大型机械工件制造等领域, 均需要量程大至百米到千米量级, 精度达到或优于微米量级的大尺寸高精度绝对距离测量.

激光诞生后, 基于其高亮度、高相干性和准直特性, 产生了干涉法^[1]、飞行时间法^[2]等多种激光测距技术. 激光干涉法测量精度可达亚波长数量级, 但非模糊范围小, 测量过程中需要依赖导轨进行条纹计数实现增量式位移测量; 飞行时间法可实现较大量程, 但由于光速极快, 时间测量精度有限, 测距精度较低. 这两种方法都不能实现大尺寸下高

精度的绝对距离测量. 随着飞秒激光频率梳原理和技术的成熟, 以飞秒激光器为光源的绝对距离测量技术快速发展, 光频梳独特的时域和频域特性使测距系统得以同时实现大量程和高精度^[3,4].

飞秒激光是时域脉宽在飞秒(10^{-15} s)数量级的周期性超短激光脉冲, 其在频域上为一系列频率稳定、等间隔分布且频谱范围极宽的谱线, 称为光学频率梳. 光频梳脉冲重复频率可由原子钟锁定, 具有很高的频率稳定性^[5,6]; 各条谱线即各纵模间具有恒定的频率间隔, 不同频率间隔的谱线之间会形成模间拍^[7]. 飞秒激光技术出现后, 发展出了多种测距方法, 如2000年日本的Minoshima团队首先提出的基于模间拍频的多波长干涉法^[8,9], 2006年韩国的Joo和Kim^[10]首先提出的光谱干涉法, 2009年美国的Coddington等^[11]提出的双光梳测距方法, 以及本课题组在2013年提出的基于光梳的外差干涉测量法^[12]. 这些基于光频梳的测距方法较传统激光测距方法在精度或测量范围上有极大提高^[13,14].

* 大学生创新创业训练计划资助项目 (批准号: 201510003B022)、航天器高精度测量实验室基金、国家自然科学基金 (批准号: 61575105)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLST201406) 和北京市高等学校青年英才计划 (批准号: YETP0085) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn

在上述方法中, 基于模间拍频的多波长干涉法使用一套飞秒激光光源, 激光器无需锁定载波包络偏移频率(f_{ceo}), 系统结构简单, 且该方法可对测量范围内任意距离进行同等精度的测量, 不存在测量盲区, 因此有广阔的应用前景. 其基本原理是搭建类似迈克尔逊干涉仪的干涉光路, 利用光频梳模间差拍信号进行多波长相位式测距, 通过电外差方法和低通滤波选择出信号中的某一谐波成分, 精确测量参考光信号与测量光信号之间的相位差, 解算待测距离. 但由于相位差的 2π 周期性, 测量的非模糊范围仅为波长的 $1/2$, 因此模间拍频多波长干涉法的测距量程仅为几米, 不能满足大尺寸测量的需求.

利用飞秒激光器谐振腔长可调谐的特性, 通过调整谐振腔长改变重复频率, 可以使用两个相近的重复频率进行合成波长测量. 合成波长远大于单一重复频率模间差拍信号波长, 因此可将量程扩展至千米数量级以上, 且保持了单一重复频率模间拍频方法的测距精度, 可实现大尺寸高精度的距离测量. 本文研究了合成波长法扩大飞秒激光模间拍频法测距量程的方案, 分析了影响测距精度的因素和测量误差对量程扩大的限制. 在超过模间拍频法量程的 5.92 m 距离下验证了合成波长测距方案的可行性, 测距重复性优于 $3\text{ }\mu\text{m}$, 理论最大扩展量程可达 7.5 km ; 在 1125 mm 行程内与双频激光干涉仪比对位移测量结果, 获得了优于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的残差标准差. 并且在实验中验证了监测臂光路和双快门系统对于补偿和消除电路漂移和大幅抖动导致的相位差测量误差的作用, 获得了 30 min 内连续测量标准差约 0.022° 的相位差测量精度.

2 原理和实验系统

飞秒激光在频域上为一系列等间隔分布的谱线, 各纵模频率为 $f_{\text{comb}} = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, n 为梳齿序数^[7]. 各纵模间形成的拍频均为重复频率的整数倍, 即模间差拍信号包含的频率成分可表示为 $f = mf_{\text{rep}}$, m 为正整数.

若使用模间差拍信号中频率为 mf_{rep} 的成分进行相位法测距, 测量出参考信号与测量信号间相位差 $\Delta\phi_m$, 则绝对距离测量结果可表示为

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{c}{2nmf_{\text{rep}}} \left(\frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + N_m \right) \\ &= \frac{\lambda}{2m} \left(\frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + N_m \right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 c 为真空光速, n 为空气折射率, 可根据空气折射率的相关理论由环境参数确定^[15,16], $\lambda = c/(nf_{\text{rep}})$ 为光频梳基频波长. 由于仪器测得的相位差在 $0-2\pi$ 范围内, 测距结果存在模糊范围, (1)式中自然数 N_m 表示仪器无法决定的相位差 2π 周期数目. 在不能预先给出待测距离估计值的情况下, 最大可测距离为 $D_{m,\text{max}} = \lambda/(2m)$.

由原子钟锁定重复频率后, 光频梳重复频率抖动 $\delta f_{\text{rep}} < 1\text{ mHz}$, 综合考虑仪器误差和测量随机误差, 相位差的测量误差 $\delta\phi$ 在 0.01° 数量级, 相对误差 $\frac{\delta\phi}{\Delta\phi_m} \gg \frac{\delta f_{\text{rep}}}{f_{\text{rep}}}$, 相位差测量为主要误差来源, 根据(1)式可得距离测量误差为 $\delta D_m = \frac{\lambda\delta\phi}{4m\pi}$, 即测距使用的光频梳模间差拍频率越高, 测距误差越小, 精度越高. 综合考虑量程和精度, 在测量时先用 $f = f_{\text{rep}}$ 的基频成分进行大量程粗测, 此时若待测距离在量程 $D_{\text{max}} = \lambda/2$ 范围内, $N_1 = 0$, 可根据 $\Delta\phi_1$ 测量结果由(1)式直接确定基频测距结果 D_1 ; 再换用 $f = mf_{\text{rep}}$ 的高次谐波进行精确测量, 整数 N_m 由相位差 $\Delta\phi_m$ 测量结果和 D_1 确定, $N_m = \left\lfloor \frac{2mD_1}{\lambda} - \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + \frac{1}{2} \right\rfloor$, 由(1)式可得精度较高的测量结果

$$\begin{aligned} D &= D_m \\ &= \frac{\lambda}{2m} \left(\frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + \left\lfloor \frac{2mD_1}{\lambda} - \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right), \end{aligned} \quad (2)$$

由此可以同时实现高精度和较大的量程.

本实验搭建的光路系统基本结构如图1所示. 频率梳激光中心波长 1560 nm , 脉冲宽度 300 fs , 光谱宽度 36 nm , 输出功率 40 mW (经EDFA放大). 其重复频率 $f_{\text{rep}} = 56.27\text{ MHz}$, 锁定在原子钟上, 可通过调制谐振腔长改变重复频率^[17]. 激光在分光棱镜 BS_1 处分为两路, 一路为固定长度的参考臂, 通过光纤进入光电探测器 PD_1 ; 另一路在分光棱镜 BS_2 处再分为两路, 一路为固定长度的监测臂, 由平面镜 M 反射返回, 另一路为长度可变化的测量臂, 通过凹面镜组反射扩束后由反射目标 C 处返回. 监测臂和测量臂光束通过光纤进入同一探测器 PD_2 , 并可通过机械快门 S_1, S_2 交替切换. 反射目标为角锥反射镜, 位于约 5.92 m 绝对距离处, 可通过平移台沿光路方向移动约 1125 mm 行程, 用一双频激光干涉仪监测其位移用于比对实验系统测量结果. 探测器 PD_1 和 PD_2 (New Focus Model 1611) 带宽均为 1 GHz .

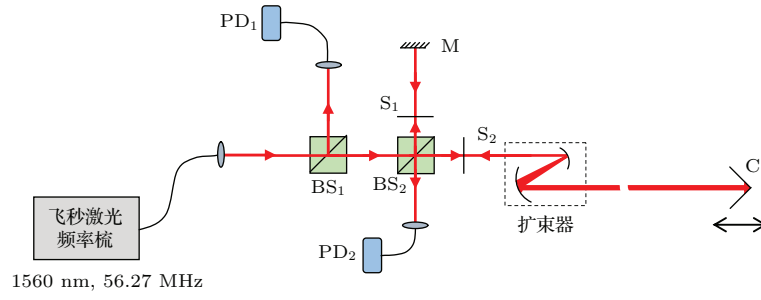


图1 实验系统光路简图

Fig. 1. The optical setup of the measurement system.

实验中, 快门 S_1 , S_2 快速交替开启, 分别测量监测臂与参考臂的相位差 $\Delta\phi_{\text{compare}}$ 、测量臂与参考臂的相位差 $\Delta\phi_{\text{measure}}$. 由于参考臂和监测臂均为固定长度, 而测量臂和监测臂共用测量电路, $\Delta\phi_{\text{compare}}$ 的变化可以反映由于 PD_1 , PD_2 及与它们连接的电路导致的相位差测量结果漂移或抖动. 由于电路漂移速度远低于快门切换速度, 可以认为 $\Delta\phi_{\text{measure}}$ 和 $\Delta\phi_{\text{compare}}$ 的测量对于电路漂移是同时的, 即可取 $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{measure}} - \Delta\phi_{\text{compare}}$ 作为相位差测量结果, 以消除电路漂移或抖动误差对于测距结果的影响^[18].

重复频率为 56.27 MHz 时模间拍频法测距量程为 $D_{\text{max}} = 2.66$ m, 这一量程在很多应用场合仍显得不足. 根据前文, 量程的限制是由于待测距离超过 $\lambda/2$ 时 N_1 不能确定导致的, 若能用某种方法确定 N_1 , 即可扩大量程. 本研究采取改变重复频率合成波长的方法扩大量程.

根据 (1) 式, 考虑使用基频测量时 $N_1 > 0$ 的情况, 令 $d_1 = \lambda\Delta\phi_1/4\pi$ 为根据仪器相位差测量值 $\Delta\phi_1$ 得出的测量结果. 改变重复频率至 $f'_{\text{rep}} = f_{\text{rep}} + \Delta f_{\text{rep}}$, 此时 $d'_1 = \lambda'\Delta\phi'_1/4\pi$ 为根据仪器相位差测量值 $\Delta\phi'_1$ 得出的测量结果, 则待测距离

$$D_1 = d_1 + \frac{\lambda}{2}N_1 = d'_1 + \frac{\lambda'}{2}N'_1, \quad (3)$$

式中 $\lambda' = c/nf'_{\text{rep}}$, 为改变重复频率后的基频波长.

容易推知, 当 $D_1 < c/(2n\Delta f_{\text{rep}})$ 时, 有 $N'_1 = N_1$, 此时可以通过测量值 d_1 和 d'_1 推算 N_1 , 并求出待测距离 D_1 , 即测距量程为

$$D'_{\text{max}} = \frac{c}{2n\Delta f_{\text{rep}}} = \frac{\lambda_s}{2},$$

其中 $\lambda_s = c/(n\Delta f_{\text{rep}})$ 为合成波长. 相比不进行重复频率调制时的量程 $D_{\text{max}} = c/(2nf_{\text{rep}})$, 由于重复频率调制满足 $\Delta f_{\text{rep}} \ll f_{\text{rep}}$ ^[17], 因此测距量程可以得到极大的扩展.

在量程范围内, 根据 (3) 式可得

$$\begin{aligned} N_1 &= \left\lfloor \frac{2(d'_1 - d_1)}{\lambda - \lambda'} + \frac{1}{2} \right\rfloor \\ &= \left\lfloor \frac{2(d'_1 - d_1)}{\Delta\lambda} + \frac{1}{2} \right\rfloor. \end{aligned} \quad (4)$$

至此解决了单一重复频率模间拍频法 $N_1 > 0$ 时无法确定其具体值的问题. 根据 (2)–(4) 式, 合成波长模间拍频法测距结果可表示为 (式中方括号均表示向下取整运算)

$$\begin{aligned} D &= D_m \\ &= \frac{\lambda}{2m} \left(\frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + \left\lfloor \frac{2m}{\lambda} \left(d_1 + \frac{\lambda}{2} \left\lfloor \frac{2(d'_1 - d_1)}{\Delta\lambda} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) - \frac{\Delta\phi_m}{2\pi} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right). \end{aligned} \quad (5)$$

为正确解算出 N_1 , $(d'_1 - d_1)$ 的测量偏差应不使取整运算结果发生变化. 根据 (4) 式, 测量误差必须满足

$$|\delta N_1| = \frac{2|\delta(d'_1 - d_1)|}{\Delta\lambda} < \frac{1}{2},$$

即限于测量误差, $\Delta\lambda$ 的取值有下限, 量程 D'_{max} 不能无限扩大.

为实现相位差精确测量和快门切换控制, 实验中搭建了图 2 所示的电路系统. 探测器输出的电信号包含光频梳模间差拍信号基波和若干高次谐波成分, 频谱上限受探测器带宽限制. 这些谐波成分频率高, 频率间隔小, 难以通过带通滤波器直接滤出某一成分并测量相位差, 因此使用外差测量方法, 在测量 mf_{rep} 的谐波成分相位差时, 用信号发生器 (Stanford Research SG384) 产生频率为 $mf_{\text{rep}} + \Delta f$ 的正弦信号, 分别与两个探测器的输出信号混频 (混频器 Mini-Circuits ZFM-4+), 混频输出信号将含有 Δf 低频成分. 当信号源对两混频器的输入信号相位相等时, 两路混频输出信号保留了两个探测器信号的相位差信息.

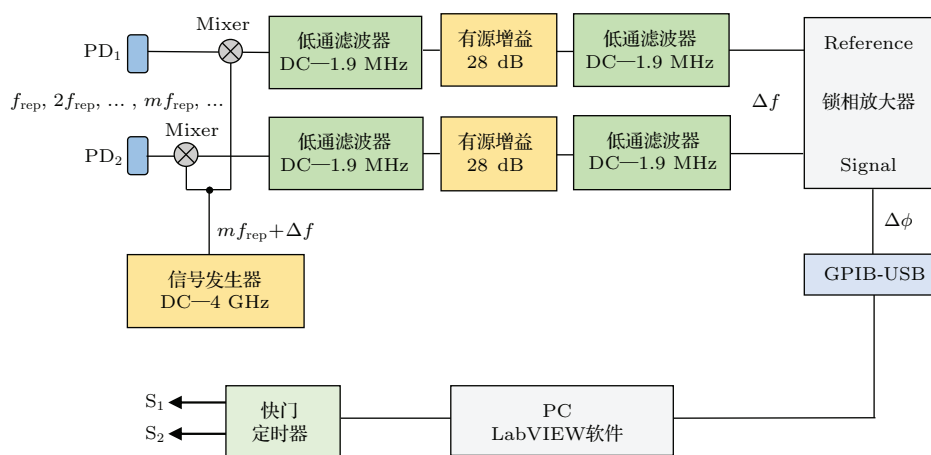


图2 实验系统电路框图

Fig. 2. Block diagram of the electronic signal processing system.

实验中取 $\Delta f = 2$ MHz, 这一频率的信号可以容易地用低通滤波器 (Mini-Circuits BLP-1.9+) 滤出, 经增益模块 (Mini-Circuits ZFL-500 LN+) 放大并再次滤波后输入锁相放大器 (Stanford Research SR844 RF Lock-in Amplifier) 测量相位差, 测量结果通过基于 PC 的 LabVIEW 软件进行采集和处理. 同时, 该软件通过快门定时器控制快门 S_1 , S_2 交替开启, 并与数据采集同步.

3 实验结果及分析

为验证监测臂光路和快门切换系统对相位差漂移的补偿作用, 将合作目标 C 固定, 使用 $20f_{\text{rep}} = 1125.4$ MHz 频率成分测量, 外差频率 $\Delta f = 2$ MHz. 在 30 min 内持续测量监测臂与参考臂的相位差 $\Delta\phi_{\text{compare}}$ 、测量臂与参考臂的相位差 $\Delta\phi_{\text{measure}}$ 以及二者之差 $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{measure}} - \Delta\phi_{\text{compare}}$, 采样时间间隔 1 s. 为便于比较, 将测量结果经过纵坐标平移处理后绘制在同一坐标系下, 如图 3 所示. 在 30 min 测量时间内, $\Delta\phi_{\text{measure}}$, $\Delta\phi_{\text{compare}}$ 均产生约 1° 的相位漂移, 二者漂移和抖动趋势相似; 作差后, $\Delta\phi = \Delta\phi_{\text{measure}} - \Delta\phi_{\text{compare}}$ 在 30 min 测量时间内无明显漂移, 标准差 0.022° . 可见加入监测臂和双快门切换的测量方法能极大地补偿和消除由电路产生的相位漂移和大幅抖动.

为验证合成波长扩大测距量程的方案, 将反射目标置于约 5.92 m 绝对距离处, 此距离超过模间拍频多波长相位法测距量程. 改变激光器腔长, 使重复频率 $f'_{\text{rep}} = 56.47$ MHz, 合成波长 $\lambda_s = c/(n\Delta f_{\text{rep}}) = 1.5$ km, 测距量程达 0.75 km.

将反射目标 C 固定, 根据前述合成波长测距原理和方案, 重复进行 10 组合成波长测量. 由 (4) 式确定的取整前 N_1 值, 及使用 $20f_{\text{rep}} = 1125.4$ MHz 谐波成分由 (5) 式确定的测距结果 D 如图 4 所示. N_1 偏离整数 2 的最大误差小于 0.05, 标准差为 0.015, 距离测量重复性标准差 $2.54 \mu\text{m}$, 实验结果验证了合成波长测距方案对于扩大量程和保持测量精度的可行性.

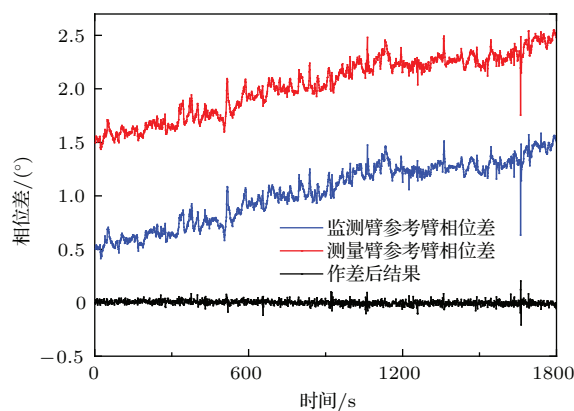


图3 (网刊彩色) 相位差测量结果 (为了显示清晰, 图中的差值曲线做了平移)

Fig. 3. (color online) Phase measurement results (the vertical origin of the black curve was shifted to zero for clarity).

以上实验中 $\Delta\lambda = \frac{c\Delta f_{\text{rep}}}{nf_{\text{rep}}^2} = 18.93$ mm, 根据

实验结果, $|\delta N_1| < 0.05$. 在此精度下, 若仅要求满足 $|\delta N_1| = \frac{2|\delta(d'_1 - d_1)|}{\Delta\lambda} < \frac{1}{2}$, Δf_{rep} 最小可取到约 0.02 MHz, 合成波长 λ_s 最大可达约 15 km, 即在本实验所得精度下, 测距量程最大可扩展至约 7.5 km.

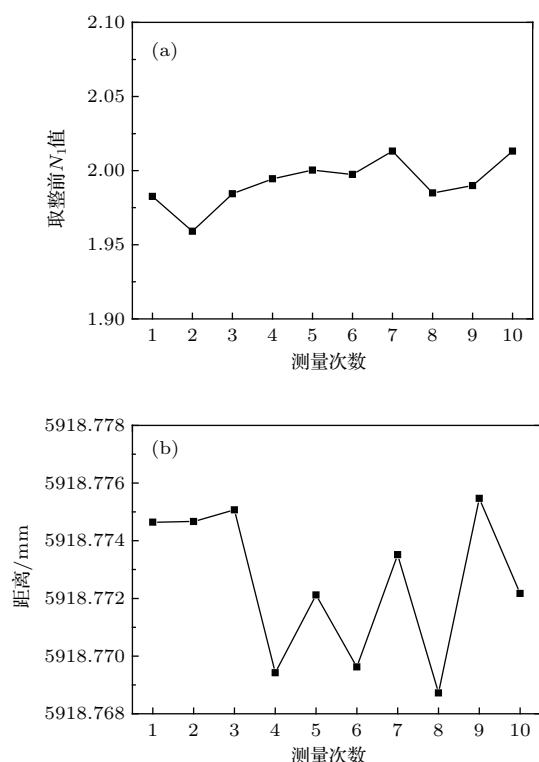


图4 合成波长重复测量结果 (a) N_1 计算结果(取整前); (b) 绝对距离测量结果

Fig. 4. Repeated measurement results: (a) Calculation results of N_1 with decimals; (b) absolute distance measurement results.

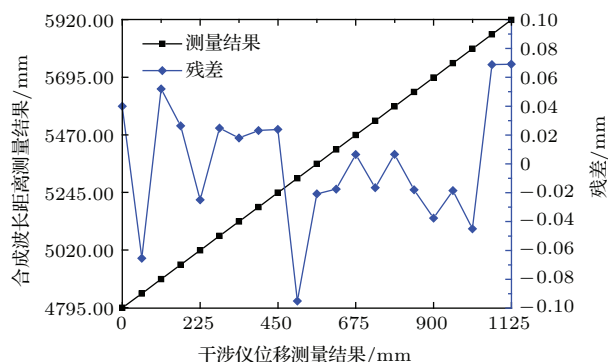


图5 (网刊彩色) 干涉仪比对测量结果

Fig. 5. (color online) Distance measurement results compared to an interferometer.

以 5.92 m 绝对距离为起点, 反射目标沿光路方向平移, 在 1125 mm 行程内以步长 56.25 mm 测量 21 处位置的绝对距离, 并与双频激光干涉仪的位移测量值比对, 测量结果和残差如图 5 所示, 所得残差标准差 42.2 μm . 实验结果说明在较大的移动范围下, 合成波长测距系统可以保持较好的线性程度和较高的测量精度.

如前文所述, 本实验中光频梳频率抖动 $\delta f_{\text{rep}} < 1 \text{ MHz}$, 它的相对误差小于 1 MHz/

56.27 MHz = 1.8×10^{-11} , 因此对测距结果的精度影响可以忽略, 相位差测量误差是主要误差来源. 引起相位差测量误差的因素包括: 1) 测量相位差的仪器(锁相放大器)本身的测量不确定度, 以及测量电路中未被监测臂和快门切换系统完全消除的抖动, 由于这些因素引入的是随机误差, 可以通过适当增加测量点数目取平均值的方式减小误差, 因此不会对测量的准确性造成较大影响; 2) 由于相位差测量结果直接与待测距离相关, 因此空气抖动引起的光路变化和折射率改变、反射目标的微小机械振动等导致的待测距离(光程)变化也将反映到相位差测量上, 引起相位差测量误差; 3) 在位移测量中, 反射目标的前后移动、导轨机械公差引起的反射目标横向微小偏移或空气扰动导致的光路偏折均会导致返回光束的位置变化, 将使探测器接收到光信号的强度发生改变, 也将导致相位差测量偏差^[18], 这一偏差为系统误差, 需要监测探测器接收到光信号强度, 对相位差测量结果进行补偿校正以减小测量误差. 除相位差测量误差外, 由于本实验系统的测量臂较长, 大气参数只是在单点测量, 无法反映整个测量路径的空气折射率分布, 折射率的计算和取值误差也将导致测距误差. 尽管存在上述各项误差, 本实验系统依然实现了 0.022° 的相位测量精度. 受探测器带宽限制, 实验中用于精确测量的 20 次谐波成分的频率仍不够高, 如果能选择更高带宽的探测器获取更高频率的谐波信号, 采用更短的波长进行测量, 则可大大提高本实验系统的精度.

4 结 论

本文研究了飞秒激光模间拍频法大尺寸测距方法, 分析了测距量程、测距精度及测量误差对量程扩大的限制. 通过原理验证性实验, 验证了监测臂和双快门切换系统对于补偿和消除由电路产生的相位差单向漂移和大幅度抖动的作用, 30 min 内相位差测量结果标准差 0.022°; 在超过单一重复频率模间拍频法量程的 5.92 m 距离处验证了合成波长扩大测距量程方案的可行性, 测距结果重复性优于 3 μm , 理论最大可扩展量程可达 7.5 km; 与干涉仪比对结果显示反射目标在 1125 mm 移动行程内, 距离测量精度优于 50 μm . 实验的测距精度还可通过选择更高带宽的探测器进一步提高.

参考文献

- [1] Bobroff N 1993 *Meas. Sci. Technol.* **4** 907
- [2] Smullin L D, Fiocco G 1962 *Nature* **194** 1267
- [3] Qin P, Chen W, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240601 (in Chinese) [秦鹏, 陈伟, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 240601]
- [4] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, Xing S J, Qu X H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 100601 (in Chinese) [吴翰钟, 曹士英, 张福民, 邢书剑, 曲兴华 2014 物理学报 **63** 100601]
- [5] Liao S S, Yang T, Dong J J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 073201
- [6] Zhang Y Y, Yan L L, Zhao W Y, Meng S, Fan S T, Zhang L, Guo W G, Zhang S G, Jiang H F 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064209
- [7] Meng F, Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Cao J P, Li T C, Fang Z J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100601 (in Chinese) [孟飞, 曹士英, 蔡岳, 王贵重, 曹建平, 李天初, 方占军 2011 物理学报 **60** 100601]
- [8] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Opt.* **39** 5512
- [9] Minoshima K, Inaba H, Matsumoto H 2007 *Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings* Portland, OR, United States, July 23–25, 2007 p186
- [10] Joo K N, Kim S W 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [11] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nature Photonics* **3** 351
- [12] Wu G H, Takahashi M, Inaba H, Minoshima K 2013 *Opt. Lett.* **38** 2140
- [13] Newbury N R 2011 *Nature Photonics* **5** 186
- [14] Hua Q, Zhou W H, Xu Y 2012 *Metrology & Measurement Technology* **32** 1 (in Chinese) [华卿, 周维虎, 许艳 2012 计测技术 **32** 1]
- [15] Edlén B 1966 *Metrologia* **2** 71
- [16] Bönsch G, Potulski E 1998 *Metrologia* **35** 133
- [17] Hochrein T, Wilk R, Mei M, Holzwarth R, Krumbholz N, Koch M 2010 *Opt. Express* **18** 1613
- [18] Doloca N R, Melners-Hagen K, Wedde M, Pollinger F, Abou-Zeid A 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 115302

Large-scale absolute distance measurement using inter-mode beat of a femtosecond laser*

Zhang Xiao-Sheng¹⁾ Yi Wang-Min²⁾ Hu Ming-Hao¹⁾ Yang Zai-Hua²⁾ Wu Guan-Hao^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

(Received 14 December 2015; revised manuscript received 7 January 2016)

Abstract

Large-scale absolute distance measurement system with high accuracy plays a significant role in science and engineering applications. In many fields such as aerospace technology, large-scale manufacture, geodetic survey and civil engineering, absolute distance measurement systems with a range of up to kilometers and accuracy of better than several micrometers are generally required. Traditional laser ranging methods such as the time-of-flight method and the interferometry method are difficult to achieve both large scale and high accuracy. With the development of femtosecond optical frequency comb technology, several ranging methods with larger range and higher accuracy are developed. In the frequency domain, the optical frequency comb has a large number of stable mode lines, or the longitudinal modes, at regular intervals, which generates the inter-mode beat signal. In this study, based on the inter-mode beat of a femtosecond laser, an absolute distance measurement system using multi-wavelength interferometric method is demonstrated. It has a simple experimental setup with high accuracy but in a limited range of 2.5 m due to the 2π -period of phase detection. To achieve a large-scale measurement system, the measurement range of the experimental system is extended by using the synthetic wavelength generated by tuning the repetition frequency of the laser. With a repetition frequency change of 0.2 MHz, a synthetic wavelength of up to 1.5 km is realized, thus the measurement range of the experimental setup can be extended to 0.75 km. Besides the reference and measurement path beams, a monitor path beam and two alternately opened mechanical shutters are used to measure and compensate for the phase drift due to the unbalanced drift of the electronic circuit. By using this method, the standard deviation of the phase measurement results in 30 min is 0.022° in the experiment, and the phase drift can be compensated for very well. The measurement results from the experimental system are compared with the results from a commercial heterodyne interferometer, and the comparison between results shows a precision of better than $50\text{ }\mu\text{m}$ in a displacement of 1125 mm. In the experiment, the repeatability of absolute distance measurement using the range extending method is better than $3\text{ }\mu\text{m}$, thus the range of the distance measurement system can be theoretically extended up to 7.5 km. In conclusion, we demonstrate that a large-scale absolute distance measurement system using inter-mode beat of a femtosecond laser, has a range of up to 7.5 km, an accuracy of better than $50\text{ }\mu\text{m}$ and a repeatability of better than $3\text{ }\mu\text{m}$. The accuracy of the experimental system can be further improved by using photodetectors with higher bandwidth so that a higher inter-mode beat and a shorter wavelength can be used.

Keywords: inter-mode beat, femtosecond laser, large-scale distance measurement

PACS: 06.30.Bp, 06.60.Jn, 42.62.Eh

DOI: 10.7498/aps.65.080602

* Project supported by the Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates, China (Grant No. 201510003B022), the Foundation of the Laboratory of High-accuracy Measurement of Spacecraft, China, the National Natural Science Foundation of China (Grant NO. 61575105), the Funding of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant NO. SKLST201406), and the Young Elite Teacher Project of Beijing Higher Education, China (Grant No. YETP0085).

† Corresponding author. E-mail: guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn