

基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法

廖磊 易旺民 杨再华 吴冠豪

Synthetic-wavelength based absolute distance measurement using heterodyne interferometry of a femtosecond laser

Liao Lei Yi Wang-Min Yang Zai-Hua Wu Guan-Hao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 140601 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.140601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同入射脉冲强度线性啁啾对 BaF_2 晶体交叉偏振波输出特性影响的数值模拟研究

[Investigation on the influences of linear chirp with different input pulse intensities on \$\text{BaF}_2\$ cross-polarized wave generation](#)

物理学报.2015, 64(2): 020602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020602>

基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量

[Cross-phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra-short pulses using a single mode fiber](#)

物理学报.2014, 63(24): 240601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240601>

飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度

[Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target](#)

物理学报.2013, 62(21): 210601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210601>

飞秒激光烧蚀固体靶的冲击压强

[Shock pressure in femtosecond laser ablation of solid target](#)

物理学报.2013, 62(17): 170601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170601>

利用非线性脉冲预整形实现脉冲快速自相似放大

[Fast self-similar amplification through passive nonlinear pulse pre-shaping](#)

物理学报.2013, 62(14): 140601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.140601>

基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法*

廖磊¹⁾ 易旺民²⁾ 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)

(2016年3月1日收到; 2016年4月12日收到修改稿)

本文提出了一种基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法. 系统采用两个带通滤波器产生两个具有一定波长差的单波长, 用于产生合成波长. 本方法结构简单, 能量利用率高. 与双频激光干涉仪在 40 mm 范围内的比对结果表明, 该方法比对残差的标准差为 91 nm.

关键词: 频率梳, 外差干涉, 绝对距离测量, 合成波长法

PACS: 06.60.Jn, 06.30.Bp, 42.62.Eh, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.65.140601

1 引言

近年来, 随着航天技术以及先进制造等工业技术的迅猛发展, 对大量程、高精度的绝对距离测量技术有迫切的需求. 传统的激光测距技术和激光干涉测量均难以满足此需求. 飞秒激光频率梳的出现为大量程、高精度绝对距离测量技术的发展带来了革命性的突破. 飞秒激光频率梳在时域上是一系列等间隔的超短脉冲序列, 脉冲的宽度在几飞秒至几百飞秒之间, 重复频率为数十 MHz 到 GHz 量级; 在频域上是一系列的等间隔纵模, 相邻纵模之间的间隔等于重复频率. 频率梳每根谱线的绝对频率可表示为 $f = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, 其中 n 是纵模的序数, f_{rep} 是频率梳的重复频率, f_{ceo} 是偏移频率^[1,2]. 将频率梳的重复频率 f_{rep} 和偏移频率 f_{ceo} 锁定在原子钟上, 则频率梳每根纵模的位置非常稳定. 每根纵模都相当于一把非常精确的“尺子”; 另一方面, 因为频率梳在时域上很窄, 对应在频域上的范围很宽, 不同测量范围的“尺子”数量很多, 通过不同的组合方式可以将这些尺子结合起来使用, 增大测量范围; 此外, 频率梳测距是绝对距离测量, 无须在测量起点

和目标之间架设导轨, 方便在各种场合中使用.

正因为频率梳具有上述优点, 各国研究人员在频率梳测距领域开展了大量的研究, 提出了多种基于频率梳的测距方法. 根据其基本原理, 可将这些测距方法分为如下几类: 以相邻脉冲间隔作为刻度的空间刻尺法^[3-8], 以频率梳作为波长基准的干涉法^[9,10], 多波长干涉法^[11-13], 色散干涉法^[14-18], 双光梳干涉法^[19-23], 外差干涉法等^[24-26]. 其中, 空间刻尺法结构简单, 得到了广泛的应用. 在空间刻尺法的研究中, 脉冲对准的精度是关键, 因为它决定了测距的精度.

本课题组在 2013 年提出了一种基于合成波长法的飞秒激光脉冲对准方法^[24], 该系统利用倍频晶体产生二倍频信号, 并根据基频光波长与倍频光波长二倍不等的特点, 构建了合成波长作为桥梁, 可将外差干涉相位作为飞秒脉冲对准的依据, 从而提高测距精度. 然而, 该方案采用倍频晶体产生二倍频信号, 使得实验系统变得复杂, 光路部分调节比较困难; 并且倍频之后的能量损失较多, 对干涉信号的影响比较大.

为了解决上述的问题, 本文提出了一种结构更

* 国家自然科学基金(批准号: 61575105)、清华大学自主科研项目(批准号: 20151080460)、航天器高精度测量实验室基金和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(批准号: SKLST201406)资助的课题.

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

简单的合成波长飞秒脉冲对准方法,并基于此构建了测距系统.在该系统中,我们使用两个带通滤光片产生两个不等的单波长,并且两个单波长的中心波长可通过改变光线入射滤光片的角度来控制,因此可灵活控制合成波长的大小.与倍频法构建合成波长相比,该方法系统结构简单,且光能损失小.为了验证该方案的测距精度,我们在40 mm的范围内与激光干涉仪进行了线性比对,本方法得到的结果的最大残差为100 nm左右,残差标准差为91 nm,绝对残差以及残差标准差与之前方法的结果相当,但本系统测量范围比原系统增大了几十倍(原系统测量范围为2 mm),因此测距相对精度比原系统有大幅提高.

2 原理和实验系统

图1是实验系统示意图,主体结构是迈克耳孙干涉仪.为了减小空气扰动对实验系统的干扰,我们把整个系统放置在泡沫盒中.光源FLFC为自行构建的光纤飞秒激光器,激光器腔中有电动延迟线,可以调节激光器的腔长,从而改变重频.实验所用频率梳的中心波长为1550 nm,输出功率13 mW,重复频率调谐范围是76.35—78.41 MHz,对应光程差的改变量约为100 mm,因此本实验系

统的测距范围是100 mm.从光源发出的脉冲序列经过一个1:99的耦合器C,1%的能量进入探测器PD₃,并且利用频率计数器测量重频,用于锁定重频;99%的能量进入准直透镜CL中,并经过CL出射到空间中用于测距.

飞秒激光经过分光棱镜BS₁后分为两束,一束进入测量臂(称之为测量光),一束进入参考臂(称之为参考光),测量臂与参考臂的光程差等于相邻脉冲间隔 L_{pp} ,根据 $L_{pp} = c/f_{rep}$ 可知 L_{pp} 为4 m左右.为减小实验系统体积,在测量臂中用反射镜M₂和M₃搭建了一个折叠光路,以增加光程差.测量光分别经过反射镜M₁,折叠光路,角锥棱镜CR₁(可移动)和反射镜M₄后,到达分光棱镜BS₂;参考光经过声光调制器AOM(驱动频率为80 MHz)的一级衍射光与测量光在分光镜BS₂处合光,产生干涉.干涉信号分别经过两个带通滤波片BPF₁和BPF₂,选出两个中心波长不同的干涉信号并且用探测器PD₁和PD₂探测这两个不同中心波长的干涉信号.根据文献[24],干涉信号中含有一系列频率的拍信号,这些拍信号的频率可以表示为 $(N \cdot f_{rep} - 80)$ MHz, N 为整数.考虑到锁相放大器的测量频率范围,我们选出其中频率最低的拍信号用于测量,因此在探测器PD₁和PD₂后使用了两个5 MHz低通滤波器,滤出频率最低的拍信号.

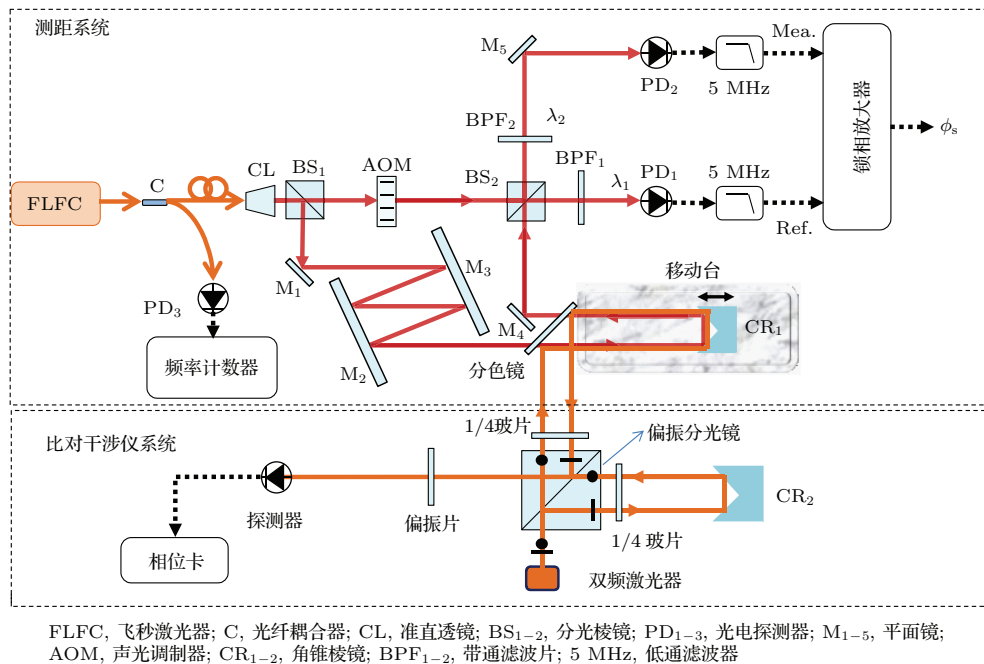


图1 (网刊彩色) 实验系统图

Fig. 1. (color online) Schematic of experimental setup.

经过低通滤波器后得到的5 MHz拍信号是BPF带宽内多对光梳梳齿的拍信号的叠加, 下面我们来讨论这个拍信号的相位与中心谱线得到的拍信号相位的关系. 频率梳的第 n 根谱线输出的电场分量可以表示为

$$E_n = A_n e^{i[2\pi f_n(t - \frac{x}{c}) + \phi_n]}, \quad (1)$$

式中 A_n 为第 n 根谱线对应的振幅; $f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$, 为第 n 根谱线对应的频率, f_{rep} 为重复频率, 在我们的实验中为75 MHz; f_{ceo} 为偏移频率; x 为光程; c 为环境对应的光速; ϕ_n 为第 n 根谱线的初始相位. 参考光经过AOM后频率移动了 Δf , 在我们的系统中等于80 MHz. 因此5 MHz的干涉信号由第 n 根测量谱线和第 $n-1$ 根参考谱线拍得到. 对应的测量光和参考光谱线输出的电场分量可以表示为

$$E_{\text{mea}} = A_1 e^{i[2\pi f_n(t - x_1/c) + \phi_n]}, \quad (2)$$

$$E_{\text{ref}} = A_2 e^{i[2\pi(f_{n-1} + \Delta f)(t - x_2/c) + \phi_{n-1}]}, \quad (3)$$

式中 A_1, A_2 分别为测量光和参考光的振幅, x_1 为测量臂的长度, x_2 为参考臂的长度, 则第 n 根谱线得到的5 MHz拍信号可以表示为

$$I_n = (E_{\text{mea}} + E_{\text{ref}})(E_{\text{mea}} + E_{\text{ref}})^*. \quad (4)$$

将 $f_n = nf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$ 代入(4)式中, 整理得到第 n 根谱线得到的5 MHz拍信号的相位为

$$\phi = \frac{2\pi}{c}[(\Delta f - f_{\text{rep}})x_2 - f_n(x_1 - x_2)] + \phi_n - \phi_{n-1}. \quad (5)$$

为了计算方便, 令相邻纵模的初始相位差为零, 即 $\phi_n - \phi_{n-1} = 0$. 经过BPF后的光谱是对称的, 假设中心谱线对应的序数为 n_c , 由中心谱线得到的5 MHz拍信号的相位为

$$\phi_c = \frac{2\pi}{c}[(\Delta f - f_{\text{rep}})x_2 - f_{n_c}(x_1 - x_2)]. \quad (6)$$

关于中心谱线对称的序号为 $n_c - \Delta n$ 和 $n_c + \Delta n$ 的两根谱线, 由它们得到的5 MHz拍信号为

$$I = I_{n_c - \Delta n} + I_{n_c + \Delta n}. \quad (7)$$

经过整理得到这个信号的相位 $\phi = \phi_c$. 因此, 所有梳齿拍的叠加信号的相位与光谱中心谱线得到的拍信号相位相同, 即锁相放大器测得的相位是中心谱线拍信号的相位.

将经过BPF₁和BPF₂的两个信号分别输入锁相放大器(ZI公司, HF2 LI)的测量端和参考端, 测量这两路干涉信号的相位差, 即两个单波长构成的合成波的相位 ϕ_s .

在实验的过程中, 我们设置移动台每次移动固定的步长. 移动台每移动一次后, 通过改变重频, 使得干涉信号强度达到最大. 仅仅通过干涉信号强度极值来判断脉冲对准的精度一般为几微米(粗对准), 我们将对准偏差记为 δ . 为了提高脉冲对准及测距精度, 我们利用合成波长的相位将对准偏差进行细分. 这种方法的基本原理可以用下式表示:

$$\delta = 2D - \Delta l_{\text{pp}}/n_g = [N + \Delta\phi_s/(2\pi)]\lambda_s, \quad (8)$$

式中 D 为角锥棱镜CR₁从位置1移动到位置2经过的距离; Δl_{pp} 为所测量的两个位置间的脉冲间隔差; n_g 为空气中的群折射率, 可根据空气折射率的经验公式由环境参数确定^[27,28]; N 为整数部分, 是实验中惟一的未知参数; $\Delta\phi_s$ 是两个位置间的合成波相位差; λ_s 为合成波长.

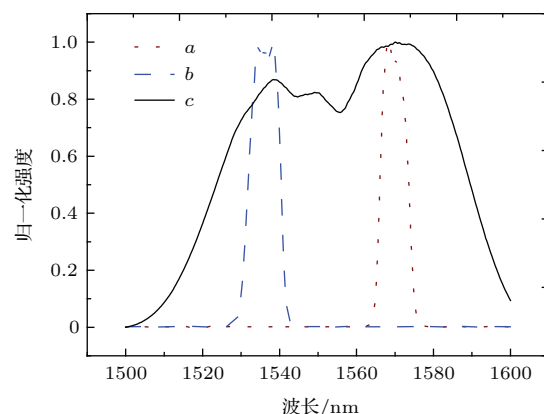


图2 干涉信号光谱图(a 为波长1光谱, b 为波长2光谱, c 为原始光谱)

Fig. 2. Spectrum of the interference signal (a , Spectrum of wavelength 1; b , spectrum of wavelength 2; c , original spectrum).

本实验系统可通过控制两带通滤波片BPF₁和BPF₂的姿态以调整光线透过滤光片的入射角, 以选择合适的单波长. 图2是实验所用信号的光谱图, 其中曲线 a 为波长1光谱, 曲线 b 为波长2光谱, 曲线 c 为原始光谱. 需要强调的是, 根据(8)式可以得到该方法的测距精度为 $\Delta\delta = \lambda_s \cdot \Delta\phi_s/(2\pi)$, 因此在相位的测量精度 $\Delta\phi_s$ 一定的情况下, 合成波长 λ_s 越小, 测距精度越高. 要使合成波长小, 则两个单波长的波长差要尽可能大. 但是, 根据合成波长的选择原则^[29], 实验中所选的合成波长应该大于4

倍的强度极值对准的精度(即上级粗对准的精度),才能确定(1)式中整数 N ,避免加大误差.并且所选的两单波长光谱均应该在原始光谱范围内,将两单波长光谱置于强度较大的位置,减小能量损失.根据以上原则,在实验中,我们选择的两个单波长分别为1569.80和1536.02 nm,由这两个单波长得到的合成波长是71.39 μm .

为评估该测距系统的精度,实验系统中搭建了比对干涉仪系统(图1).飞秒激光与比对干涉仪所用激光的合束通过分色镜来实现.在实验的过程中,用LabVIEW程序记录合成波相位变化,再经Matlab程序处理转换成测距结果.

3 实验结果及分析

由于实验室中的空气扰动和温度变化会影响测距系统的稳定性,因此我们将整个实验系统放置在泡沫盒中.为了验证泡沫盒对实验效果的改进作用,我们分别测量了使用泡沫盒和不使用泡沫盒情况下450 s左右的合成波相位漂移,结果如图3所示.测量过程中,锁相放大器的时间常数设置为1 s,采样率设置为56 Hz.为方便观察,图中得到的相位值均为某时刻的相位值减去初始时刻相位值的差,数值直接反映相位的变化量.图中曲线 a 展示了不使用泡沫盒时相位的漂移情况,相位的最大漂移量对应着8.56 μm 的光程差变化;曲线 b 展示了使用泡沫盒时相位的漂移情况,相位的最大漂移量对应着0.21 μm 的光程差变化.因此使用泡沫盒能极大地减小相位漂移,改善系统的稳定性.

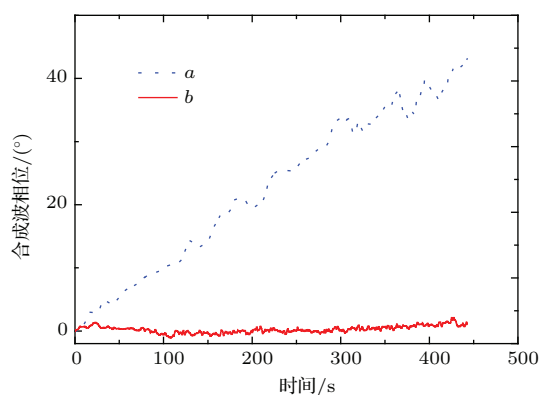


图3 相位漂移测试(a 为不使用泡沫盒的合成波相位漂移曲线, b 为使用泡沫盒的合成波相位漂移曲线)

Fig. 3. Test of phase shift (a , phase shift without the cover; b , phase shift by using the cover).

为验证该方法的测距精度,与干涉仪进行了线性比对实验.目标靶镜在移动台上以5 mm的步长移动了8步,通过比对干涉仪软件记录下每步的移动量作为比对值.每移动一步,都通过调节激光器重频使得干涉信号强度达到最大(实现粗对准),记录下每个位置对应的重频值,可以计算出粗测的距离值;再利用每个位置记录下的合成波相位值,根据(8)式对粗测值进行修正,可以得到精测的距离值.图4是线性实验的结果.其中曲线 a 是利用重频以及合成波相位计算出的最终结果值的拟合曲线,曲线 b 是粗测的残差分布曲线,曲线 c 是精测的残差分布曲线.最大残差为156 nm左右,残差的标准差为91 nm,本结果与本课题组之前报道的结果相当(之前实验的残差分布为-95—72 nm),但本文中所测的距离更长(之前实验的测距范围是2 mm),相对精度比之前提高了一个数量级,并且本文所采用的实验系统更为简单.

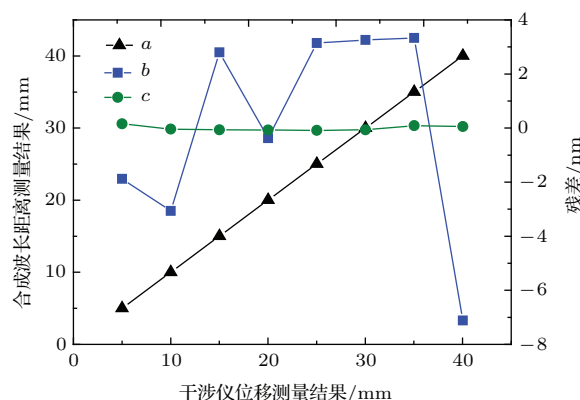


图4 干涉仪比对测量结果(a 为拟合结果, b 为强度极值对准(粗测)的残差, c 为合成波相位对准(精测)的残差)

Fig. 4. Distance measurement results compared to an interferometer (a , linear fitting of the data measured; b , residuals obtained by applying the interference intensity peak-finding method; c , residuals obtained by applying the phase of the synthetic wavelength for measurement).

下面对影响本实验精度的因素进行分析.

首先,由于空气扰动、温度等环境因素的影响,比对干涉仪存在漂移.通过测量,比对干涉仪系统在1000 s内的漂移量为1.4 μm 左右.而比对干涉仪系统和测距系统并不是完全共路,如图1,这两个系统共路部分很少.但在最终的比对中,我们将非共路部分的漂移也计入了比对值中,导致我们使用的比对值不准确,给测量精度带来影响.

其次,由于实验中所用光源的偏移频率没有锁定,而发生干涉的两个脉冲并不是同一个脉冲,偏

移频率的变化对两脉冲干涉的相位会有影响, 从而会带来合成波相位的漂移. 我们用 0.03 Hz 的正弦波调制激光器的抽运电流 (调制深度 8 mA), 得到合成波相位随时间的变化关系曲线 (图 5). 相位的变化周期与调制信号基本一致, 而调制抽运电流即相当于调制了偏频, 说明偏频变化对相位有较大影响. 在此调制深度下, 合成波相位的调制幅度为 8° 左右, 对应 $1.59 \mu\text{m}$ 的光程差变化.

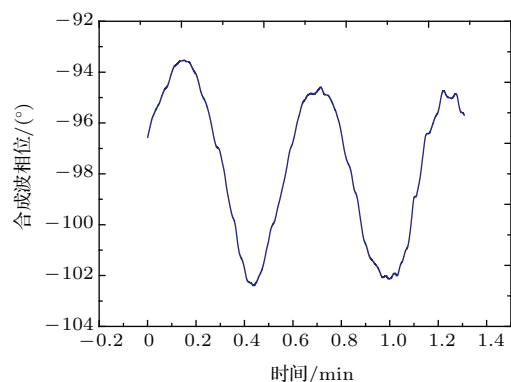


图5 偏频对合成波相位影响

Fig. 5. Phase drift caused by f_{ceo} .

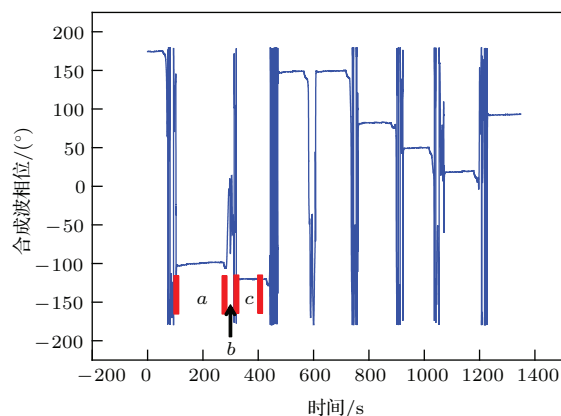


图6 (网刊彩色) 实验过程记录的相位图

Fig. 6. (color online) Phase recorded during the experiment.

第三, 合成波相位、干涉仪结果和重频在本实验中不是同步记录的, 会引起一定的测量误差. 图 6 是整个实验过程记录的合成波相位曲线. 根据前文描述的距离计算方法, 计算一段距离需要涉及三个参数——移动前后合成波相位值、移动前后重频值、移动前后比对干涉仪数值, 因此会涉及三个过程——移动前、移动时、移动后, 分别对应图 6 中的 a , b , c . b 阶段是移动台移动的阶段, 因此相位是快速变化的, 但是并不影响计算所需的最初和最终相位值. 计算移动前和移动后的相位值的方法是:

在 a , c 段取较平整的部分取平均, 作为移动前和移动后的相位. 而重频以及干涉仪结果是在每次移动完平移台后记录的 (b 阶段的末端). 因此重频、干涉仪结果与相位的记录并非同步, 这段时间差内的系统漂移会引起测量误差.

4 结 论

本文提出了一种结构简单的飞秒激光外差干涉合成波测距方法. 该方法利用两个带通滤波片产生两个不同的单波长, 从而构成合成波长. 这种方法与本课题组之前使用倍频晶体的方案相比, 结构更加简单, 合成波长的大小可调, 并且能量损耗更小. 与双频激光干涉仪比对结果表明, 在 40 mm 范围内, 本方法比对残差的标准差为 91 nm, 相对测距精度优于之前系统. 该系统的测距精度可以通过改进光路使得比对干涉仪光路和测距光路尽可能共路, 锁定激光器偏移频率以及提高数据采集同步性等措施进一步提高.

参考文献

- [1] Huang B, Feng M, Chen X D, et al. 2009 *Laser J.* **30** 16 (in Chinese) [黄保, 冯鸣, 陈新东等 2009 激光杂志 **30** 16]
- [2] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J, Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134205 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 林百科, 方占军, 李天初 2012 物理学报 **61** 134205]
- [3] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [4] Cui M, Schouten R N, Bhattacharya N, Berg S A 2008 *J. Eur. Opt. Soc. -Rapid* **3** 08003
- [5] Balling P, Kren P, Masika P, van den Berg S A 2009 *Opt. Express* **17** 9300
- [6] Cui M, Zeitouny M G, van den Berg S A, Urbach H P, Braat J J M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1982
- [7] Lee J, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photonics* **4** 716
- [8] Lee J, Lee K, Lee S, Kim S, Kim Y 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 65203
- [9] Schuhler N, Salvade Y, Leveque S, Dandliker R, Holzwarth R 2006 *Opt. Lett.* **31** 3101
- [10] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M, Pollinger F, Abou-Zeid A 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 115302
- [11] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Opt.* **39** 5512
- [12] Hyun S, Kim Y, Kim Y, Jin J, Kim S 2009 *Meas. Sci. Technol.* **20** 95302
- [13] van den Berg S A, Persijn S T, Kok G, Zeitouny M G, Bhattacharya N 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 183901
- [14] Joo K, Kim S 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [15] Joo K, Kim S 2008 *Opt. Express* **16** 19799
- [16] Xia H, Zhang C 2010 *Opt. Express* **18** 4118

- [17] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, Qu X H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 020601 (in Chinese) [吴翰钟, 曹士英, 张福民, 曲兴华 2015 物理学报 **64** 020601]
- [18] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, Li J S, Shi Y Q, Qu X H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 020601 (in Chinese) [刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 李建双, 石永强, 曲兴华 2016 物理学报 **65** 020601]
- [19] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [20] Liu T, Newbury N R, Coddington I 2011 *Opt. Express* **19** 18501
- [21] Lee J, Han S, Lee K, Kim E, Bae S, Lee S, Kim S, Kim Y 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 45201
- [22] Wu G, Zhou Q, Shen L, Ni K, Zeng X, Li Y 2014 *Appl. Phys. Express* **24** 106602
- [23] Wu G, Xiong S, Ni K, Zhu Z, Zhou Q 2015 *Opt. Express* **23** 32044
- [24] Wu G, Takahashi M, Inaba H, Minoshima K 2013 *Opt. Lett.* **38** 2140
- [25] Wu G, Arai K, Takahashi M, Inaba H, Minoshima K 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 15203
- [26] Wu G, Takahashi M, Arai K, Inaba H, Minoshima K 2013 *Sci. Rep.* **3** 1894
- [27] Edlén B 1966 *Metrologia* **2** 71
- [28] Bönsch G, Potulski E 1998 *Metrologia* **35** 133
- [29] Falaggis K, Towers D P, Towers C E M 2012 *Appl. Opt.* **51** 6471

Synthetic-wavelength based absolute distance measurement using heterodyne interferometry of a femtosecond laser*

Liao Lei¹⁾ Yi Wang-Min²⁾ 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 1 March 2016; revised manuscript received 12 April 2016)

Abstract

Large-scale and high precision absolute distance measurement is essential in aerospace technology and advanced manufacturing. Traditional method of measuring distance cannot meet this requirement. Since the advent of optical frequency comb, it has brought a revolutionary breakthrough to absolute distance measurement. In the past decade, there were proposed many methods to measure long absolute distances with high accuracy. Especially, the simple method of using adjacent pulse-to-pulse distance as a ruler for distance measurement has been widely used. The accuracy of this method depends mainly on the knowledge of relative positions of the two overlapped pulses, i.e., pulse-to-pulse alignment. In our previous study, we have proposed a heterodyne interferometer based on synthetic wavelength method with femtosecond laser. The synthetic wavelength is derived from the virtual second harmonic and the real second harmonic, and the real second harmonic is produced by a piece of periodically poled LiNbO₃ (PPLN) crystal. However, the second harmonic generation system makes the system complicated, and causes a great optical energy loss. In order to solve this problem, we generate the synthetic wavelength by two spatial band-pass filters in our present study, which can simplify the system greatly. Moreover, we can reduce the optical energy loss and tune the synthetic wavelength by controlling the angle of the filter. The synthetic wavelength used in the present system is 71.39 μm . The interferometric

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575105), Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 20151080460), the Foundation of the Laboratory of High-Accuracy Measurement of Spacecraft, and the Funding of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant No. SKLST201406).

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

phase of the synthetic wavelength is used as a mark for the pulse-to-pulse alignment. In order to reduce the influences of air disturbance and temperature variation, we set up a thermal-insulated cover for the interferometer to stabilize the environment in the system. By using this cover, the optical path length difference of the system in 450 s can be reduced from 8.56 μm to 0.21 μm . To demonstrate the efficacy of the method described above, the target mirror is moved by eight steps in steps of 5 mm. We compare the measurement results with those obtained by a commercial interferometer, and the residual error is less than 100 nm. Since the measurement range is larger than our previous study, the relative accuracy is better than the previous system. In conclusion, we demonstrate a synthetic-wavelength based absolute distance measurement by using heterodyne interferometry of a femtosecond laser. Two spatial band-pass filters are used to generate the synthetic wavelength, which can simplify the system. The comparison results show that the system has an accuracy better than 100 nm in a displacement of 40 mm. The accuracy of the experimental system can be further improved by making the common-path of the two interferometers longer, locking the f_{ceo} to the atomic clock and sampling the data synchronously.

Keywords: optical frequency comb, heterodyne interferometry, absolute distance measurement, synthetic wavelength

PACS: 06.60.Jn, 06.30.Bp, 42.62.Eh, 42.25.Hz

DOI: [10.7498/aps.65.140601](https://doi.org/10.7498/aps.65.140601)