

基于交替起振光电振荡器的大量程高精度绝对距离测量技术

谢田元 王菊 王子雄 马闯 于洋 李天宇 方杰 于晋龙

Long-range, high-precision absolute distance measurement technology based on alternately oscillating optoelectronic oscillator

Xie Tian-Yuan Wang Ju Wang Zi-Xiong Ma Chuang Yu Yang Li Tian-Yu Fang Jie Yu Jin-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 130601 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190238

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190238>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于重采样技术的调频连续波激光绝对测距高精度及快速测量方法研究

High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave laser ranging

物理学报. 2015, 64(23): 230601 <https://doi.org/10.7498/aps.64.230601>

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 <https://doi.org/10.7498/aps.64.020601>

飞秒脉冲非对称互相关绝对测距

Absolute distance measurement based on asymmetric cross-correlation of femtosecond pulse

物理学报. 2018, 67(21): 210601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181274>

基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法

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

物理学报. 2016, 65(8): 080602 <https://doi.org/10.7498/aps.65.080602>

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 <https://doi.org/10.7498/aps.65.020601>

基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法

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

物理学报. 2016, 65(14): 140601 <https://doi.org/10.7498/aps.65.140601>

基于交替起振光电振荡器的大量程高精度绝对距离测量技术*

谢田元 王菊[†] 王子雄 马闯 于洋 李天宇 方杰 于晋龙

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

(2019年2月25日收到; 2019年4月30日收到修改稿)

提出了一种基于交替起振的光电振荡器的大量程、高精度绝对距离测量方法. 此方法构建了两个光电振荡环路, 分别为测量环和参考环. 通过切换光开关实现测量/参考光电振荡器的交替起振; 通过切换微波开关实现光电振荡器高阶/低阶振荡模式的转换; 通过频率计依次记录测量/参考光电振荡器的高阶/低阶振荡频率, 然后计算测量/参考光电振荡器的腔长进一步得到绝对距离. 本方案的优点是: 由于采用了测量/参考两个光电振荡器腔长相减的方法消除系统自身的漂移, 不需要控制腔长, 结构简单. 实验中, 利用公里量级的光纤来模拟大量程的待测距离, 利用高步进精度的光延时线来模拟距离变化. 在等效 6 km 的空间往返待测距离上, 测量误差为 3.5 μm , 相对测量精度达到 5.8×10^{-10} .

关键词: 激光测距, 光电振荡器, 绝对距离测量**PACS:** 06.30.Bp, 07.60.-j**DOI:** 10.7498/aps.68.20190238

1 引言

大量程、高精度的绝对距离测量在工业制造、科学研究、航空航天等领域发挥了重要的作用, 如大型零件的装配、星间测距^[1-3]等. 传统的绝对距离测量方法分为飞行时间法和干涉法. 飞行时间法是通过测量光往返经过待测距离的时间来测量距离, 适合长距离的测量, 但受到时间测量精度的限制, 测量分辨率限制在了毫米量级^[4]. 干涉法(如多波长干涉法、扫频干涉法^[5-8]等)是通过多个波长形成合成波长链并逐级精化, 或调频光经过目标反射与本振光拍频干涉, 可以实现纳米量级的距离测量, 但测量范围受到模糊距离的限制, 一般为几十米. 近年来, 通过采用光学频率梳技术, 进一步提高了测距的工作范围和测量精度^[9-14]. 如 Lee 等^[10]在 2010 年提出的基于飞秒光脉冲的飞行时间测距

方法, 在大气条件下、0.7 km 的待测距离上, 阿仑方差达到 117 nm. Zhu 等^[13]在 2018 年提出的基于合成波长双频梳干涉测距方法, 将飞行时间法、多波长干涉以及载波干涉法与频率梳相结合, 在 1.5 m 的长度上, 测量精度达到亚纳米量级. 从大的方面来看, 上述方法都是通过提高测量系统分辨率来提高测量精度, 对测试系统的要求较高, 其测量精度和测量范围的提高受到一定的限制: 如这些方法的高精度距离测量量程较短, 通常在百米量级^[5-14].

测量中常采用的另一种原理是积累放大的原理, 即通过放大被测量来提高测量精度, 此方法对可以在较低系统的分辨率的条件下获得更高的测试精度. 在大量程高精度的绝对距离测量方面, 光电振荡器(optoelectronic oscillator, OEO)方案就采用了积累放大原理^[15]: 其基本测量原理是将待测距离作为 OEO 腔长的一部分, 利用其振荡频率

* 国家自然科学基金科学仪器基础研究专项(批准号: 61427817)和国家自然科学基金(批准号: 61775162, 61601321)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangju@tju.edu.cn

和腔长的变化关系来获得长度信息; 振荡器工作在高阶谐波振荡条件下, 实现积累放大; 光电振荡器的腔长一般在 km 量级, 可以实现大量程的高精度距离测量^[15,16]. 但由于振荡频率反映的是整个振荡回路的腔长变化, 而整个振荡回路包含了待测的距离和振荡器固有的长度, 如何分离二者的变化从而得到真实的待测距离就成了该方法的技术难点. 在文献^[15,16]中, 通过搭建两个 OEO, 将待测距离置于其中一个 OEO 的环路中, 构成测量环路; 另一路和测量环路共用除待测距离外的振荡环路, 构成参考环路. 此时待测距离即为两个 OEO 腔长的差值. 实验结果表明此方案在等效距离为 6 km 范围内, 相对测量精度达到 2.5×10^{-10} . 但需要指出的是此方案为了保证测量精度的准确性, 采用了锁相环控制光纤拉伸器的方法对参考环路进行腔长控制. 这需要多个拉伸量和精度不同的光纤拉伸器以及复杂的控制算法才能实现 μm 量级的控制精度, 从而增加了系统的复杂性, 限制了此方案的应用. 此外, 由于振荡器的特性, 此方案中测量环和参考环并非严格共用除测量长度外的所有振荡环路, 即两路腔长存在非公共部分. 这意味着即使锁定了参考环路, 测量环路中的非公共部分仍然存在慢漂, 造成误差. 为了摆脱腔长控制对整个测量系统的限制, 同时消除两腔非公共部分慢漂对测量系统的影响, 我们提出了基于交替起振光电振荡器的绝对距离测量方法.

本方法的主要思路是: 通过光开关实现测量/参考 OEO 间的切换, 实现二者交替起振, 此时除了被测长度外的两个振荡环路完全一致. 当切换速度足够快时, 可认为两个腔的共用部分是时不变的. 通过频率计依次记录测量/参考光电振荡器的振荡频率计算出测量/参考环的长度. 测量的两个环的长度差即为待测距离. 此外, 本方案还通过切换微波开关实现高阶/低阶振荡模式的切换以进行腔长的粗测.

本方案由于每次距离测量都重新测量参考 OEO 的腔长, 因此不需要考虑由于测量/参考 OEO 的慢漂带来的误差积累, 所以参考 OEO 的腔长也不需要控制, 从而简化了系统. 文中对此方案进行了理论分析和实验验证. 实验结果显示在等效 6 km 的空间往返光路上, 相对测量精度达到 5.8×10^{-10} .

2 方案的理论分析

基于交替起振光电振荡器的绝对距离测量系统框图如图 1 所示. 激光器、强度调制器、光开关、长光纤、光电探测器、放大器、微波开关、滤波器、电耦合器等构成了基本光电谐振腔. 其中, 激光器波长为 1550 nm, 输出功率 100 mW; 强度调制器的带宽为 20 GHz; 光开关是 2×2 高速磁光开关, 切换速度为 30 μs , 在实验中用于两个振荡环的切换; 光延时线的量程为 330 ps, 最小步进为 0.3 μm (General Photonics 公司的 MDL-002), 主要用于模拟待测距离变化, 验证测量精度; 长光纤为 5 km 普通单模光纤; 光电探测器的带宽为 30 GHz; 微波开关为 DC-20 GHz 单刀双掷微波开关, 用于改变振荡器的振荡频率; 带通滤波器的中心频率为 9.9 GHz, 带宽 10 MHz; 低通滤波器带宽为 100 MHz; 微波移相器为机械式微波移相器; 40 kHz—38 GHz 宽带的微波放大器 (SHF 806E) 用于放大高频和低频信号. 光延时线置于光开关 IN2 端口和 OUT2 端口之间作为待测距离. 当光开关处于交叉状态时, 光延时线接入 OEO 环路, 与其他部分构成测量环, 定义为 OEO1, 如图 1(a) 所示; 当光开关处于平行状态时, 构成参考环, 定义为 OEO2, 如图 1(b) 所示. 通过切换光开关可以实现 OEO1 与 OEO2 间的切换. 带通滤波器置于电耦合器 1 的 A 端口和微波开关的 A 端口, 低通滤波器和移相器置于电耦合器 1 的 B 端口和微波开关的 B 端口. 通过微波开关在 A, B 端口切换可以实现高阶模式和低阶模式起振频率的切换.

根据 OEO 起振的原理^[7], 其基频 f_0 与 OEO 的腔长 L 的关系为

$$L = \frac{c}{n f_0}, \quad (1)$$

其中, c 为真空中光速, n 为光在介质中的折射率 (在光纤中, $n \approx 1.5$). 通常, OEO 在高阶模式上起振, 起振频率 f_{hmm} 在几 GHz 至几十 GHz, 由 OEO 中窄带滤波器的中心频率决定. f_{hmm} 与 f_0 的关系为 $f_{\text{hmm}} = N_{\text{hmm}} \cdot f_0$, 其中 N_{hmm} 为高阶振荡模式数 (N_{hmm} 为整数). 根据积累放大原理^[15,16], 我们可以通过测量 OEO 的高阶振荡频率 f_{hmm} 和振荡模式数 N_{hmm} 来反推出精确的 f_0 , 实现大量程、高精度的长度测量. 以我们的实验条件为例: 光纤长度 5 km,

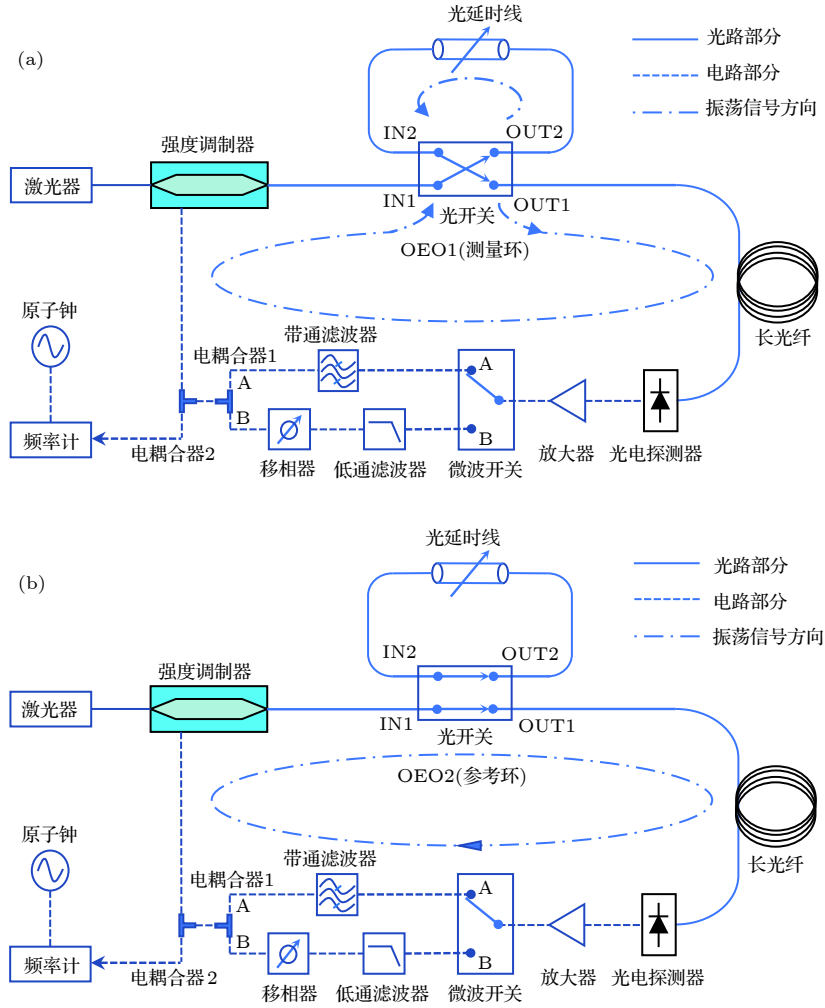


图 1 基于交替起振光电振荡器绝对距离测量的基本结构 (a) 光开关处于交叉状态, 测量环振荡; (b) 光开关处于平行状态, 参考环振荡

Fig. 1. Basic structure of absolute distance measurement method based on alternately oscillating OEO: (a) The measurement loop oscillates with optical switch at cross state; (b) the reference loop oscillates with optical switch at parallel state.

光纤折射率 $n = 1.5$ 的条件下, 起振频率 f_{hm} 在 9.9 GHz 附近, 线宽可达 mHz 量级 [18]. 此时基频 f_b 约为 40 kHz, N_{hm} 约为 2.475×10^5 . f_{hm} 只需测到 Hz 量级, 频率测量就达到 10^{-10} 的精度, 根据正确的 N_{hm} 值反推出 f_b 也在 10^{-10} 量级. 因此, 测量精度取决于 f_{hm} 的测量准确性和 N_{hm} 值的正确性.

由于 N_{hm} 为整数, N_{hm} 通过粗测基频 f_b^* 来得到, N_{hm} 通过下式计算:

$$N_{hm} = \left[\frac{f_{hm}}{f_b^*} \right], \quad (2)$$

其中, $[]$ 为四舍五入取整运算, 粗测的基频 f_b^* 为相邻起振模式的频率间隔. 在保证 N_{hm} 的正确性条件下, f_b^* 测量值的范围应满足 $\frac{f_{hm}}{N_{hm} + 0.5} < f_b^* < \frac{f_{hm}}{N_{hm} - 0.5}$, 即 f_b^* 测量精度要求在 $\pm \frac{f_{hm}}{2N_{hm}^2}$ 内. 在我

们的实验条件下, 此 f_b^* 的精度要求在 ± 0.08 Hz 以内. 在高阶模式起振时 (9.9 GHz), 频率计对 f_{hm} 的测量精度在 Hz 量级, 无法直接得到符合精度要求的 f_b^* . 这时, 需要降低起振频率, 以提高频率的测量精度. 方案中我们设置了微波开关, 通过切换到 B 端口选择低通滤波器, 就可以让 OEO 在低阶模式上振荡. 当振荡频率 f_{hm} 低于 100 MHz, 频率计的测量精度很容易达到 0.01 Hz, 满足对基频进行粗测的要求. 低阶模式振荡频率 f_{hm} 满足 $f_{hm} = N_{lm} \cdot f_b$ 关系, N_{lm} 为低阶振荡模式数 (N_{lm} 为整数). 由于 OEO 每次在低阶频率起振时, 其可能在通带内的任意模式上起振, 起振模式间的频率差为谐振腔基频 f_b 的整数倍, 最小频率间隔即为 f_b . 连续测量起振频率可以得到一系列频率差 $\Delta f_{lm,i}$. 将 $[\Delta f_{lm,i}]_{\text{kHz}}$ 定义为 $\Delta f_{lm,i}$ 精确到 kHz 后的整数值, 求

得 $[\Delta f_{lm}]_{\text{kHz}}$ 的最大公约数定义为 f_{GCD} . 该最大公约数即为精确到 kHz 的最小跳频间隔. 则各频率差对应的模式间隔数 ΔN_{lmi} 表示为 $\Delta N_{lmi} = [\Delta f_{lm}]_{\text{kHz}}/f_{\text{GCD}}$. 因此各测量时刻的基频 f_b 表示为 $f_b = \Delta f_{lmi}/\Delta N_{lmi}$. 由于不同模式的振荡频率在不同时刻测得, 受到环境影响, f_b 与 f_b 并不严格相等. 但只要两次测量的腔长变化在 $\Delta L = \frac{cN_{hm}}{nf_{hm}} - \frac{c(N_{hm} \pm 0.5)}{nf_{hm}} = \pm \frac{c}{2nf_{hm}}$ 以内, 计算得到的 N_{lm} 的正确性就不会受到影响. 在我们的实验条件下, 腔长差应保证在 ± 10 mm 以内. 在温度变化不大、测量时间较短的情况下是很容易达到的. 根据 f_b 与 f_{lm} 可以确定低阶振荡模式数 N_{lm} , 进而得到粗略测量的 f_b^* . N_{lm} 和 f_b^* 分别用 (3) 和 (4) 式计算得到:

$$N_{lm} = \left[\frac{f_{lm}}{f_b} \right], \quad (3)$$

$$f_b^* = \frac{f_{lm}}{N_{lm}}. \quad (4)$$

需要注意的是, 直接用低通滤波器替代窄带滤波器会导致微波电路部分的时延不同. 从前面的分析可知: 为了使低阶模式下计算得到的 f_b^* 可以直接代入高阶模式时的 f_b^* , 两部分电路的长度差也要控制在 ± 10 mm 以内. 这可以利用矢量网络分析仪测量并调整微波移相器实现.

最终 OEO 腔长 L 的计算公式如下:

$$L = \frac{cN_{hm}}{nf_{hm}} = \frac{c}{nf_{hm}} \left[\frac{f_{hm}}{f_b^*} \right]. \quad (5)$$

为了模拟空间中大量程距离测量的情况, 我们用 km 量级的长光纤代替真实的空间待测距离. 理论上, 该长光纤应置于光开关 IN2 端口和 OUT2 端口之间. 但长光纤容易受环境影响导致光纤长度变化, 此变化量无法精确预知, 也就无法对系统的测量精度进行校准和评价. 为此, 不失一般性, 将这部分光纤置于 OEO1 和 OEO2 的公共部分, 这样一方面保证了测试系统的长谐振腔与大量程测量系统的一致性, 另一方面也保证了对系统测量精度的精确评估.

如上所述, 在一个完整的测量过程中, 光开关和微波开关依次切换, 系统处于 4 个不同测量状态: 高阶谐振条件下测量测量环、低阶谐振条件下测量测量环、高阶谐振条件下测量参考环、低阶

谐振条件下测量参考环. 定义 OEO1 在高阶和低阶模式起振的频率和振荡模式数分别为 f_{hm1} , N_{hm1} 和 f_{lm1} , N_{lm1} ; OEO2 在高阶和低阶模式起振的频率和振荡模式数分别为 f_{hm2} , N_{hm2} 和 f_{lm2} , N_{lm2} . 光开关所处状态和微波开关的切换顺序以及 f_{hm1} , f_{lm1} , f_{hm2} , f_{lm2} 的测量顺序如图 2(a) 所示. 在 $t_1^i, t_2^i, t_3^i, t_4^i, t_1^{i+1}, t_2^{i+1}, t_3^{i+1}, t_4^{i+1} \dots$ 时刻切换微波开关; 在 $t_1^i, t_3^i, t_1^{i+1}, t_3^{i+1} \dots$ 时刻切换光开关状态; 开关切换后依次测量 $f_{hm1}^i, f_{lm1}^i, f_{hm2}^i, f_{lm2}^i, f_{hm1}^{i+1}, f_{lm1}^{i+1}, f_{hm2}^{i+1}, f_{lm2}^{i+1}, \dots$. 根据 (5) 式, 对应的 OEO1 和 OEO2 的腔长依次为 $L_1^i, L_2^i, L_1^{i+1}, L_2^{i+1}, \dots$, 如图 2(b) 所示.

当分别得到测量环和参考环的腔长后, 待测的距离就是二者的差. 但是由于测量时刻不同, 腔长

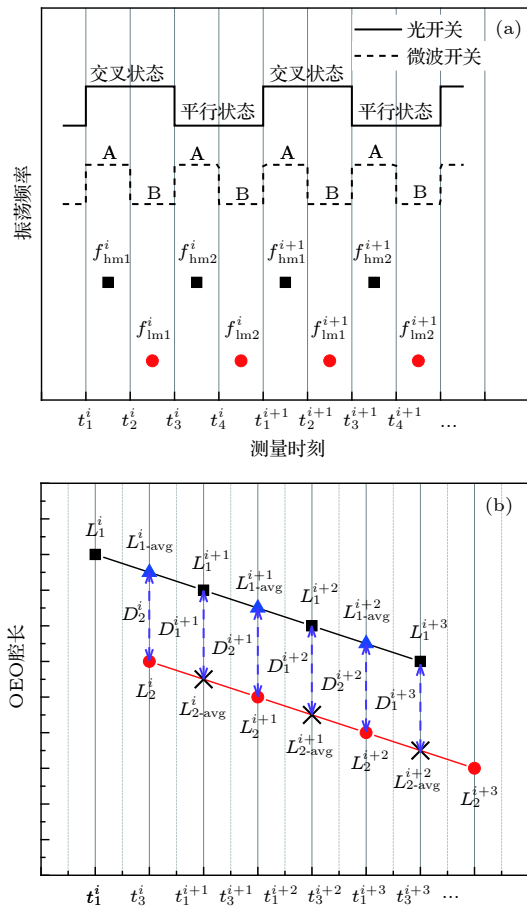


图 2 距离测量过程 (a) 光开关、微波开关切换时刻及相应的频率测量; (b) OEO1 和 OEO2 的腔长测量及绝对距离测量

Fig. 2. Distance measurement process: (a) The switching moments of optical switch and microwave switch and corresponding frequency measurement process; (b) loop length measurement of OEO1, OEO2 and the absolute distance measurement.

的时变特性会影响测量的精度. 在我们的实验中, 考虑到温度等影响因素的瞬时变化率很小, 不存在跳变, 可以认为短时间内腔长变化是近似线性的, 因此, t_3^i 时刻测量的 OEO1 腔长近似表示为 L_1^i 和 L_1^{i+1} 的平均值 $L_{1-avg}^i = \frac{L_1^i + L_1^{i+1}}{2}$, 此时, OEO2 的腔长为 L_2^i . t_3^i 时刻, OEO1 和 OEO2 的腔长差即为待测距离 D_2^i , 表示为:

$$D_2^i = \frac{L_1^i + L_1^{i+1}}{2} - L_2^i, \quad (6)$$

同理, 也可以得到 t_1^{i+1} 时刻的待测距离 D_1^{i+1} 表示为:

$$D_1^{i+1} = L_1^{i+1} - \frac{L_2^i + L_2^{i+1}}{2}. \quad (7)$$

最终的待测距离测量过程如图 2(b) 所示.

3 实验系统及测量结果

在实验中, 首先采用了 5 km 的光纤 (等效于 7.5 km 的空间距离) 进行测试. 频率计测量一次过程如图 3 所示. 0—25 ms, 光开关处于交叉状态、微波开关切换到 A 位置, OEO1 在高阶模式起振; 25—125 ms, 频率计记录 f_{hm1} ; 125—150 ms, 光开关处于交叉状态、微波开关切换到 B 位置, OEO1 在低阶模式起振; 150—250 ms, 频率计记录 f_{lm1} ; 250—275 ms, 光开关处于平行状态、微波开关切换到 A 位置, OEO2 在高阶模式起振; 275—375 ms, 频率计记录 f_{hm2} ; 375—400 ms, 光开关处于平行状态、微波开关切换到 B 位置, OEO2 在低阶模式起振; 400—500 ms, 频率计记

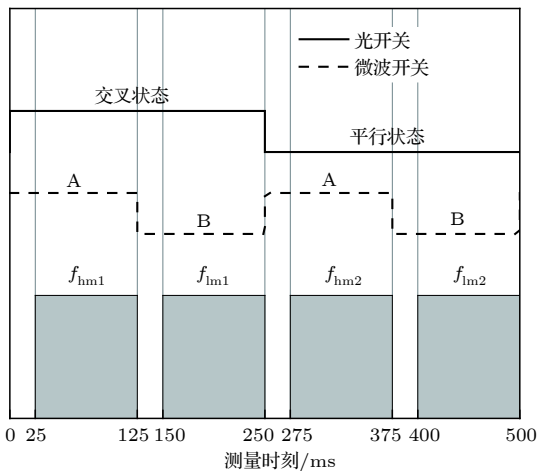


图 3 开关切换及频率计计数时序图

Fig. 3. The switching time and frequency counting timing diagram.

录 f_{lm2} .

OEO 在高阶、低阶模式起振时产生的微波信号的频谱分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示. 电谱仪 (Agilent 8564 EC) 的频宽 (SPAN) 设置为 200 kHz, 带宽分辨力 (RBW) 设置为 3 kHz. 从图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, OEO 产生的微波信号边模约为 40 kHz, 且测量/参考环在高阶/低阶模式振荡时, 边模抑制比均大于 40 dB. 虽然没有文献 [15] 中采用双环光电振荡器结构的边模抑制比高, 但 40 dB 的边模抑制比并不影响频率计的正常工作的, 因此对系统的测量精度没有影响.

测量过程中, 为了保证频率测量的准确性, 频率计以铷原子钟作为时间基准, 实验采用的铷原子钟的长期频率稳定度为 5×10^{-12} , 频率计的门控时间设置为 100 ms. OEO 起振在高阶和低阶模式时, 频率计的频率分辨率分别为 1 Hz 和 0.01 Hz.

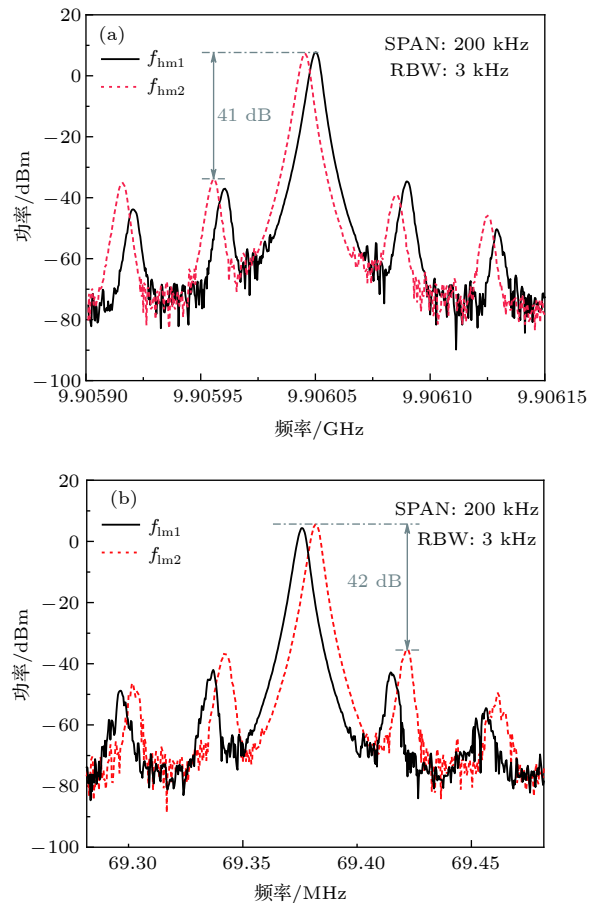


图 4 测量/参考环振荡信号的频谱图 (a) 高阶模式起振; (b) 低阶模式起振

Fig. 4. RF spectrum of oscillating frequencies of measurement/reference loop: (a) With OEO oscillating at high-order mode; (b) with OEO oscillating at low-order mode.

光延时线在 0 mm 位置时, 频率计连续测量 10 次, 结果如图 5(a) 所示. OEO1 和 OEO2 的高阶起振频率 f_{hm1} 和 f_{hm2} 分别用方形点和圆点表示, 可以看出, f_{hm1} 和 f_{hm2} 起振在 9.906 GHz 附近, 测试过程中存在跳模现象, 分别跳变了 7 次和 5 次 (如虚线所示). OEO1 和 OEO2 的低阶起振频率 f_{lm1} 和 f_{lm2} 分别用三角形点和 \times 形点表示, 可以看出, f_{lm1} 和 f_{lm2} 起振在 69 MHz 附近, 且分别发生了 7 次和 6 次跳模 (如虚线所示地). 经计算, 测量环的 f_{GCD} 为 40 kHz, f_{lm1} 在第 3 次和第 4 次测量时的跳模频率间隔为最小跳模间隔. 根据各测量时刻的频率差以及 f_{GCD} 可以得到各测量时刻的 f_b . 将 f_b 以及相应时刻测量的 f_{lm1} 代入 (4) 式计算得到各测量时刻的 f_{b1}^* , 约为 39818.14 Hz. 同理, 可以

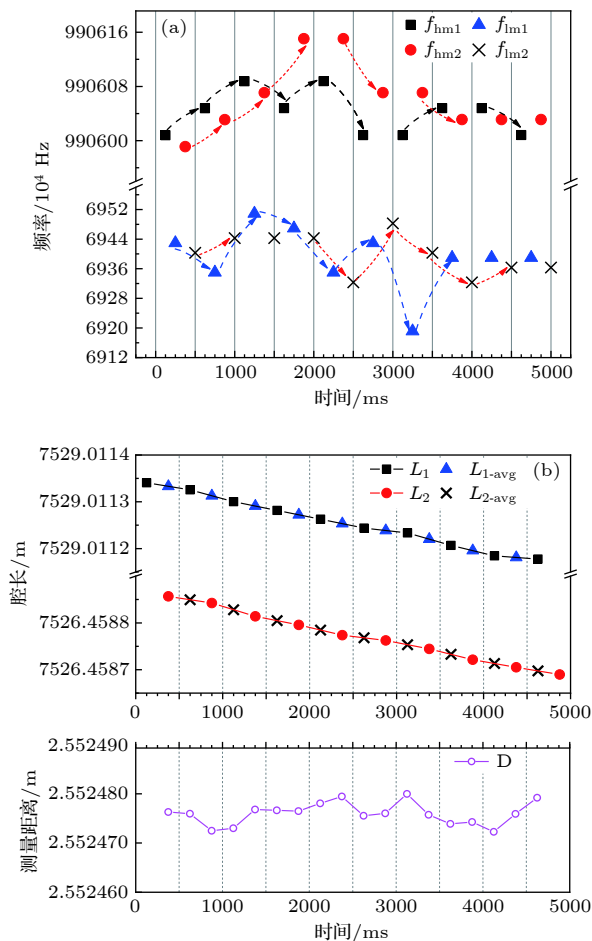


图 5 长光纤为 5 km 光延时线在 0 mm 位置时的测量结果 (a) OEO1 和 OEO2 起振频率测量值; (b) OEO1 和 OEO2 的腔长及待测距离测量结果

Fig. 5. Measurement results at 0 mm position of optical delay line with 5 km fiber: (a) Oscillating frequencies of OEO1 and OEO2; (b) loop lengths of OEO1 and OEO2, and distance measurement results.

得到 f_{b2}^* 约为 39831.73 Hz.

将各测量时刻的 f_{b1}^* 和 f_{b2}^* 代入 (5) 式, 可以得到 OEO1 和 OEO2 的腔长, 并计算相邻腔长的平均值. 如图 5(b) 所示, OEO1 和 OEO2 的腔长分别用方形点和圆点表示, 相邻腔长的平均值分别用三角形点和 \times 形点表示. 待测距离为对应时刻 OEO1 和 OEO2 腔长的差值, 用空心圆表示. 可以看出, OEO1 和 OEO2 的腔长在测量过程中分别从 7529.011341 m 和 7526.458857 m 逐渐减小为 7529.011177 m 和 7526.458690 m; 而待测距离趋于定值, 平均值为 2.552476 m, 标准差为 2.7 μ m.

为了进一步验证所提方案的正确性, 将光延时线从初始位置位移 8 次, 每次位移为 10 mm, 延时线位移误差小于 0.3 μ m. 按照上述方法, 对光延时线的每个位置进行距离测量, 每个位置测量/参考 OEO 的高阶/低阶连续测量 10 次, 得到 18 个测量距离. 将 18 个测量距离取平均后作为测量结果与光延时线的位移距离进行比较, 结果如图 6 所示. 光延时线位移距离与测距结果用方形点表示, 有很好的线性关系. 测距结果与光延时线各位移距离的误差用三角点表示, 误差线表示为每个测量距离的标准差. 可以看出, 在 7.5 km 的空间距离上, 在整个测量范围内误差为 4.2 μ m, 每个测量距离的标准差均小于 4 μ m, 相对测量精度为 5.6×10^{-10} . 等效成实际应用的往返测量时, 就是测量范围为 3.75 km, 误差与标准差相应减半, 相对测量精度不变.

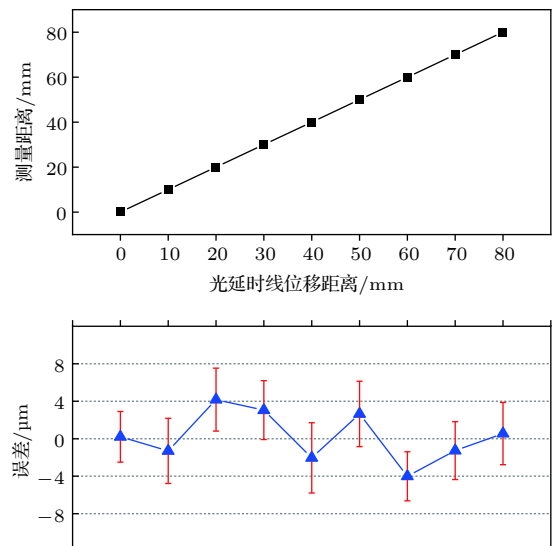


图 6 长光纤为 5 km 时测量距离与光延时线位移距离的关系

Fig. 6. The relationship between measured distance and position variation of optical delay line with 5 km fiber.

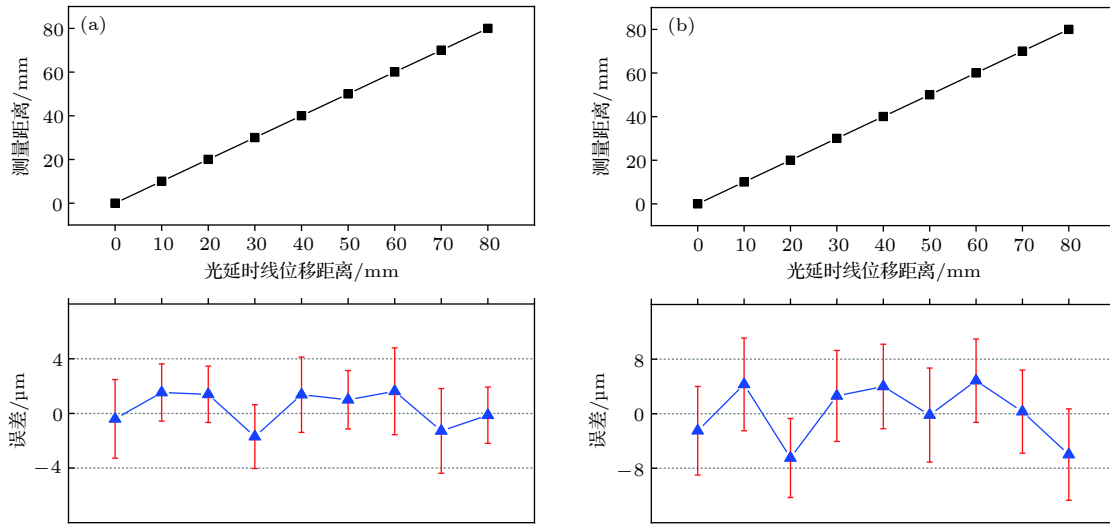


图 7 测量距离与光延时线位移距离的关系 (a) 1 km 长光纤; (b) 8 km 长光纤

Fig. 7. The relationship between measured distance and position variation of optical delay line: (a) With 1 km fiber; (b) with 8 km fiber.

为了验证系统的工作范围,我们将 5 km 长光纤分别替换为 1 km 和 8 km 的长光纤,来模拟 0.75 km 和 6 km 的空间往返距离.测量距离与光延时线位移的关系分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示.通过分析可以得到,等效往返待测距离 0.75 km (1 km 长光纤) 时,整个测量范围内误差为 1 μm ,每个测量距离的标准差均小于 1.8 μm ,相对测量精度为 1.3×10^{-9} ;等效往返待测距离 6 km(8 km 长光纤) 时,整个测量范围内误差为 3.5 μm ,每个测量距离的标准差均小于 3.5 μm ,相对测量精度达到 5.8×10^{-10} .

以上结果是在现有的实验条件下取得的,考虑到以下因素,本方案还有进一步改善的空间: 1) 由于实验条件的限制,本实验的长光纤并没有放在测量距离上,而在实际应用当中,待测距离会存在于测量 OEO 中而不是在公共部分,因此公共部分长度很短,受环境的影响更小; 2) 实验中所使用的光开关是光纤耦合结构,如果做成空间结构,光路带来的误差将会更小; 3) 如果能够采用测试速率更高的频率计也能进一步提高系统的测量精度.

4 结 论

本文提出了一种基于交替起振光电振荡器的大量程、高精度绝对距离测量方法.实验采用了测量、参考光电振荡环交替起振、测量的方法.从而有效消除了光电振荡器自身漂移对测量带来的不

利影响.在保持了 OEO 测距的大量程、高精度优点的同时,不需要对 OEO 的腔长进行控制,大大简化了系统,扩展了系统的可用性.实验结果表明:在等效 6 km 的空间往返待测距离上,测量误差为 3.5 μm ,每个测量距离的标准差小于 3.5 μm ,相对测量精度达到 5.8×10^{-10} .此方法为解决大量程、高精度绝对距离测量技术难题提供了一种可行的思路.

参考文献

- [1] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, Parker D H 2002 *CIRP Ann.* **51** 587
- [2] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, Thompson P F, Watkins M M 2004 *Science* **305** 503
- [3] Kim J, Lee S W 2009 *Acta Astronaut.* **65** 1571
- [4] Dickey J O, Bender P L, Faller J E, Newhall X X, Ricklefs R L, Ries J G, Shelus P J, Veillet C, Whipple A L, Wiant J R, Williams J G, Yoder C F 1994 *Science* **265** 482
- [5] Falaggis K, Towers D P, Towers C E 2009 *Opt. Lett.* **34** 950
- [6] Yang H J, Deibel J, Nyberg S, Riles K 2005 *Appl. Opt.* **44** 3937
- [7] Abouzeid A, Pollinger F, Meinershagen K, Wedde M 2009 *Appl. Opt.* **48** 6188
- [8] Hei K F, Yu J L, Wang J, Wang W R, Jia S, Wu Q, Xue J Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 100602 (in Chinese) [黑克非, 于晋龙, 王菊, 王文睿, 贾石, 吴穹, 薛纪强 2014 物理学报 **63** 100602]
- [9] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [10] Lee J, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photon.* **4** 716
- [11] Lee J, Lee K, Lee S, Kim S W, Kim Y J 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 065203
- [12] Wang G, Jang Y S, Hyun S, Chun B J, Kang H J, Yan S 2015 *Opt. Express* **23** 9121
- [13] Zhu Z B, Xu G Y, Ni K, Zhou Q, Wu G H 2018 *Opt. Express*

- 26 5747
- [14] Zhang S H, Xu Z Y, Chen B Y, Yan L P, Xie J D 2018 *Opt. Express* **26** 9273
- [15] Wang J, Yu J L, Miao W, Sun B, Jia S, Wang W R, Wu Q 2014 *Opt. Lett.* **39** 4412
- [16] Chen B, Yu J L, Wang J, Li T Y, Wang W R, Yu Y, Xie T Y 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 110608
- [17] Yao X S, Maleki L 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1725
- [18] Jia S, Yu J L, Wang J, Wang W R, Wang Z X, Chen B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154204 (in Chinese) [贾石, 于晋龙, 王菊, 王文睿, 王子雄, 陈斌 2015 物理学报 **64** 154204]

Long-range, high-precision absolute distance measurement technology based on alternately oscillating optoelectronic oscillator*

Xie Tian-Yuan Wang Ju[†] Wang Zi-Xiong Ma Chuang Yu Yang
Li Tian-Yu Fang Jie Yu Jin-Long

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 25 February 2019; revised manuscript received 30 April 2019)

Abstract

Absolute distance measurement plays an important role in many areas, such as aerospace and scientific research. Traditional measurement methods generally cannot meet requirements for long-range and high-precision at the same time. In this paper, an absolute distance measurement method based on alternately oscillating optoelectronic oscillator is proposed. This method places the distance to be measured in the loop of optoelectronic oscillator and takes advantage of accumulative magnification effect to achieve high accuracy. The measurement and the reference optoelectronic oscillators are established and selected by an optical switch, and a microwave switch is used to choose the high-order or low-order oscillating frequency. The high-order frequency and low-order oscillating frequency of the measurement and reference optoelectronic oscillators are measured in turn by frequency counter to calculate the loop lengths of two optoelectronic oscillators. The low-order frequencies are used to measure the fundamental frequency roughly and the high-order frequencies are used to calculate loop length precisely. Although the mode hopping occurs in the measurement process, it does not affect the loop length calculation by substituting the corresponding oscillating mode number. Note that the loop length measurement moments of two optoelectronic oscillators are different due to the switching order of optical switch and microwave switch. In order to calculate the absolute distance, which is the length difference between two optoelectronic oscillators at the same moment, the measured loop lengths should be averaged. In this way, systematic error accumulation caused by slow drift of environment can be eliminated, and this method does not need to control the length of reference optoelectronic oscillator. Meanwhile, the measurement system is simple. In the experiment, 1 km, 5 km and 8 km fibers are placed in a common part of the measurement and reference optoelectronic oscillators to simulate different long-range distances in space. A high-resolution optical delay line is placed in the measurement optoelectronic oscillator to verify the performance of the measurement system. The experimental results show that the measurement error is $3.5 \mu\text{m}$ with a $3.5 \mu\text{m}$ maximum standard deviation of each measurement distance at an emulated round trip distance of 6 km. The relative measurement accuracy reaches 5.8×10^{-10} . This method provides a feasible idea for solving the technical problems of long-range and high-precision absolute distance measurement.

Keywords: laser distance measurement, optoelectronic oscillator, absolute distance measurement

PACS: 06.30.Bp, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.68.20190238

* Project supported by the Special Fund for Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61427817), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61775162, 61601321).

[†] Corresponding author. E-mail: wangju@tju.edu.cn