

飞秒光频梳的任意长绝对测距*

邢书剑¹⁾ 张福民^{1)†} 曹士英²⁾ 王高文³⁾ 曲兴华¹⁾

1) (天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

2) (中国计量科学研究院, 时间频率计量研究所, 北京 100013)

3) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2013年4月11日收到; 2013年7月15日收到修改稿)

高精度测距在工业、航空航天、科学研究等方面都具有重要应用, 而不断发展的激光测距技术始终处于前沿研究领域. 本文研究飞秒光频梳绝对测距技术, 拓展光梳在长度测量领域的应用. 在利用脉冲激光进行任意绝对长度测量中常用到飞行时间法, 然而其测量分辨率受限于电子器件的带宽, 仅为毫米量级. 为克服这一缺点, 本文研究了光梳多脉冲序列之间的时间相干性, 结合多脉冲序列干涉法和飞行时间法提出了任意长绝对测距的方法, 搭建了基于改进型 Michelson 干涉原理的任意绝对测长系统, 通过同时测量多脉冲序列的一阶和二阶互相关信号, 可以分别计算出飞行时间的时间差, 即可得到被测距离. 利用光梳作为光源进行了 0.6 m 的绝对测距实验, 将测量结果与高精度激光位移传感器的测量值进行比较, 实验结果表明本系统具有良好的测量线性度, 并且测距精度可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$.

关键词: 飞秒光频梳, 任意长绝对测距, 飞行时间法, 多脉冲序列干涉法**PACS:** 06.30.Bp, 42.62.Eh, 06.60.Jn**DOI:** 10.7498/aps.62.170603

1 引言

飞秒光频梳(光梳)由于频率稳定性好、光谱范围宽, 因此已被广泛应用于精密光频测量、高精度光谱仪及距离测量等精密测量领域^[1-5]. 其中, 光梳为解决高精度绝对测距问题提供了诸多有效的方法^[6-12]. 2000年, Minoshima 首次提出飞秒激光脉冲绝对测距的创新概念, 在地下隧道进行了 240 m 的绝对长度测量^[13]. 2006年 Joo 和 Kim 首次提出利用光梳的色散干涉光谱测量法^[14], 并在此基础上提出一种结合了合成波长干涉法、飞行时间法和色散干涉光谱测量法的组合测量法^[15]. 2004年, Ye 提出了干涉与非干涉相结合的光梳测距法, 但没有给予实验验证^[16]. 2008年, van den Berg 利用 Ye 提出的方法通过测量脉冲序列的二阶互相关信号进行了测距实验^[17]. 2009年, Dong 提出了基于多脉冲序列干涉的飞行时间法, 并对标准

量块进行测试实验, 但该方法只对干涉条纹的一阶互相关信号进行了分析和测量^[18].

在利用脉冲激光进行任意长度测量中常用到飞行时间法^[19] (time of flight, TOF), TOF 的关键是要精确测量脉冲之间的飞行时间差, 它取决于两个时刻, 即脉冲从测量系统发射出去的起始时间, 以及出射脉冲被物体反射回来再次被测量系统接收的截止时间. TOF 的优点是可以测量任意绝对长度, 但是其精度要低于脉冲序列干涉法. 而脉冲序列干涉法虽然测量精度高, 但只能测量离散的长度.

本文将 TOF 和多脉冲序列干涉法结合起来, 充分利用两种方法的优点进行任意绝对测长的研究. 通过记录和分析多脉冲序列的一阶和二阶互相关两种信号, 可以同时测量出二者的 TOF 时间差, 从而分别计算出被测距离, 并进行了 0.6 m 的绝对测距实验, 以验证该方法的可行性.

* 国家自然科学基金(批准号: 51105274)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120032130002)和精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(批准号: pil1201)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

2 原理

光梳在频域上可以提供一系列初始频率偏移为 f_{CEO} , 频率间隔为 f_{rep} 的频率分布; 在时域上为一系列等间隔的超短脉冲序列, 时间间隔为 $T_R = 1/f_{\text{rep}}$, 群速度和相速度之间的载波包络相位偏移为 $\Delta\phi_{\text{ce}} = 2\pi f_{\text{CEO}}/f_{\text{rep}}$. 由于光梳的相位锁定特性, 两个相邻脉冲之间的相位关系是固定的, 这就使得不同脉冲之间可以相互干涉^[20].

本文基于多脉冲序列干涉法设计了 TOF 测距系统, 如图 1(a) 所示. 光梳发出的脉冲串入射到一个改进型 Michelson 干涉仪, 该系统可用于测量 TOF 的时间差. 改进型 Michelson 干涉仪包括等臂干涉和非等臂干涉两个模块. 等臂干涉模块由分光

棱镜 BS、参考镜 M_1 和物镜 HM 组成, 其作用是记录脉冲从系统发出的起始时间. 非等臂干涉模块由相同的 BS, M_1 和另一块目标镜 M_2 组成, 其作用是记录脉冲被目标镜反射再次回到系统的截止时间. 在忽略激光功率及环境等影响因素的情况下, M_2 与 HM 之间的距离 L 可以是任意绝对长度, 表示为

$$L = (N \times c_n \times T_R + \Delta)/2, \quad (1)$$

式中, N 为整数部分 ($N = 0, 1, 2, \dots$), $N = \text{floor}[2L/(c_n \times T_R)]$, ($\text{floor}[2L/(c_n \times T_R)]$ 表示对 $2L/(c_n \times T_R)$ 进行取整, 并取小于或等于 $2L/(c_n \times T_R)$ 的最接近的整数); Δ 表示小数部分 ($0 \leq \Delta < c_n \times T_R$), $\Delta = 2L - N \times c_n \times T_R$; c_n 为光在空气中的速度.

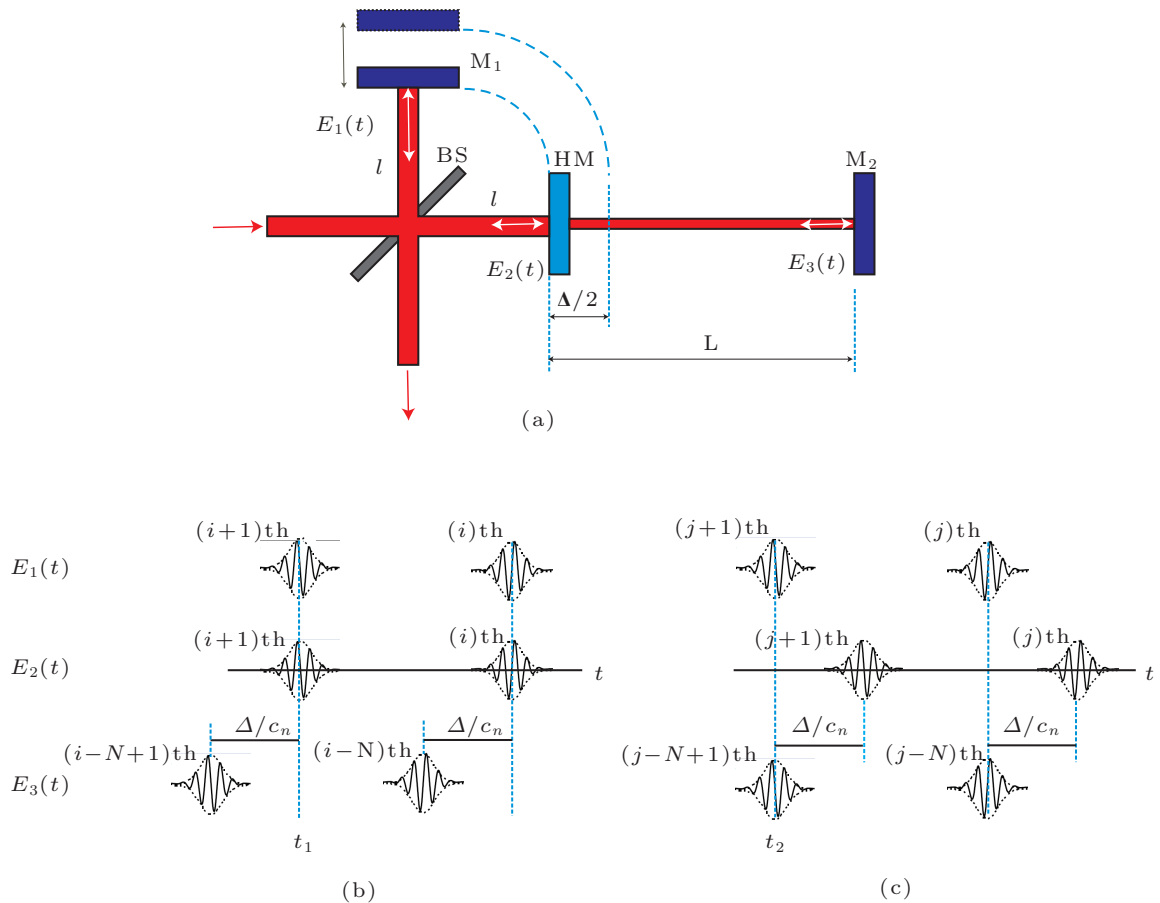


图 1 改进型 Michelson 干涉仪原理图 (a) 改进型 Michelson 干涉仪光路; (b) t_1 时刻 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 干涉; (c) t_2 时刻 $E_1(t)$ 和 $E_3(t)$ 干涉

光梳发出的脉冲串在 BS 处被分为两束光. 其中一束光射向参考臂, 并被 M_1 反射, 反射回 BS 的信号为 $E_1(t)$; 另一束光射向测量臂, 其分别被 HM 和 M_2 反射, 臂长分别为 l 和 $l+L$, 反射回 BS 的信号分别为 $E_2(t)$ 和 $E_3(t)$, BS 处的信号在时域上可

表示为

$$E_{\text{total}}(t) = E_1(t) + E_2(t) + E_3(t). \quad (2)$$

在测量过程中, 通过移动 M_1 , 使得 $E_1(t)$ 与 $E_2(t)$, $E_3(t)$ 之间分别发生干涉, 为了防止两个干涉

条纹之间产生重叠,需保证 $\Delta > 2 \times L_{\text{Rey}}$ (L_{Rey} 为瑞利极限), 这样 $E_2(t)$ 和 $E_3(t)$ 的脉冲序列在时域上不会相互重叠^[21]. 如图 1(b), (c) 所示, 在 t_1 时刻, $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 的脉冲序列相互重叠发生干涉, 由于 $E_1(t)$ 与 $E_3(t)$ 的脉冲序列不重叠, 因此不会发生干涉; 同理, 在 t_2 时刻, $E_1(t)$ 和 $E_3(t)$ 的脉冲序列发生干涉, 而 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 的脉冲序列不发生干涉. 最终, 两组相干脉冲 ($E_1(t)$ 和 $E_2(t)$) 及 ($E_1(t)$ 和 $E_3(t)$) 在 BS 处重新汇合并分别产生干涉条纹.

当一束光对另一束光扫描时, 可利用一个光电探测器接收其干涉信号, 而干涉信号可以通过一阶相关或者二阶相关分别表示. 由于光电探测器的响应相对于光频是缓慢的, 得到的信号是一个平均值, 因此 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 在 t_1 时刻所产生的一阶相关强度和二阶相关强度分别为

$$I_{12}(\tau) = \sum_{i=1}^N \langle |E_1(t_1) + E_2(t_1 + \tau)|^2 \rangle, \quad (3)$$

$$S_{12}(\tau) = I_{12}(\tau)^2 = \sum_{i=1}^N \langle |E_1(t_1) + E_2(t_1 + \tau)|^4 \rangle. \quad (4)$$

$E_1(t)$ 和 $E_3(t)$ 在 t_2 时刻所产生的一阶相关强度和二阶相关强度分别为

$$I_{13}(\tau) = \sum_{i=1}^N \langle |E_1(t_2) + E_3(t_2 + \tau)|^2 \rangle, \quad (5)$$

$$S_{13}(\tau) = I_{13}(\tau)^2 = \sum_{i=1}^N \langle |E_1(t_2) + E_3(t_2 + \tau)|^4 \rangle. \quad (6)$$

测量系统接收到的干涉条纹如图 2 所示, 图 2(a) 为一阶相关强度信号, 图 2(b) 为二阶相关强度信号. 当两组相干脉冲的干涉条纹彼此分开时, 可

由干涉条纹峰值之间的距离求得式 (1) 中的 Δ . 由于光梳的 f_{rep} 和 f_{CEO} 被锁定在频率高度稳定的微波原子钟上, 所以脉冲重复周期 T_R 和载波相位偏移 $\Delta\phi_{\text{ce}}$ 在时域上保持了高度稳定, 通过分析多脉冲序列干涉条纹可得到两个干涉条纹之间的相位差 $\Delta\phi$, 则 $N = \Delta\phi / \Delta\phi_{\text{ce}}$, 为保证 N 的单值性, 该方法需满足条件 $N \times \Delta\phi_{\text{ce}} < 2\pi$. 在得到 N 和 Δ 后, 即可利用 (1) 式求得被测距离 L .

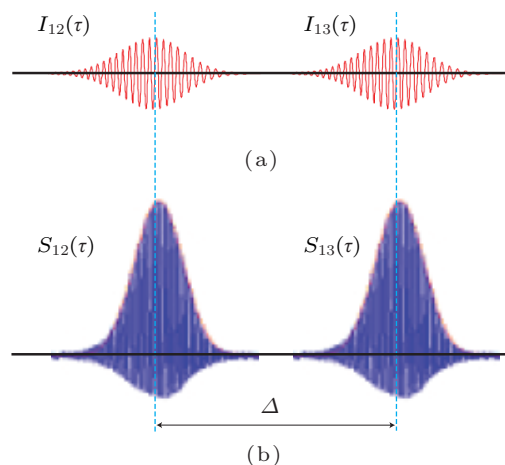


图 2 干涉条纹 (a) 一阶相关强度信号; (b) 二阶相关强度信号

3 实验

图 3 为本文设计的任意长绝对测距系统原理图, 图 4 为搭建的测量系统实物图. 利用光梳作为光源, 中心波长 1560 nm, 重复频率 $f_{\text{rep}} = 250000161.25$ Hz, 初始频率偏移为 $f_{\text{CEO}} = 40000000$ Hz, 对应的脉冲间距 l_{pp} 约为 1.2 m.

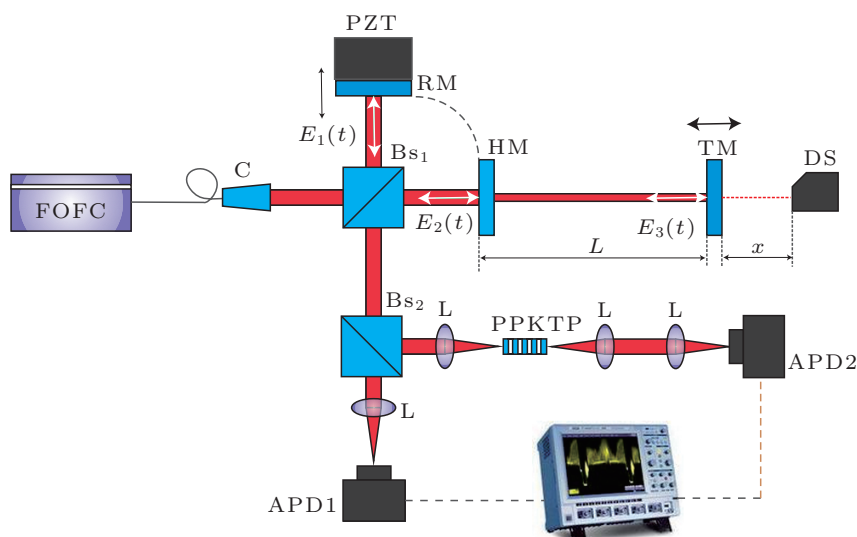


图 3 测距系统原理图

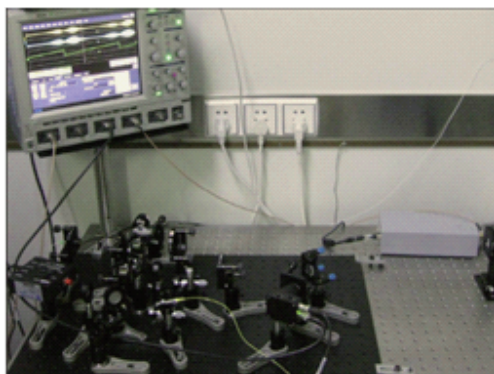


图4 测量系统实物图

光梳发出的脉冲序列经过准直透镜 C 之后变为空间光进入改进型 Michelson 干涉仪. 脉冲串在 BS1 处被分为参考光和测量光两部分. 其中参考光被参考镜 RM 反射, 参考镜固定在 PI 公司的纳米位移平台 (P-621.1) 上, 闭环量程为 100 μm , 闭环分辨力为 0.4 nm, 实验中由纳米位移平台驱动参考镜实现对测量光的扫描. 测量光则进入测量臂依次被物镜 HM 和目标镜 TM 反射, 其中 HM 为一片反射型 ND 滤光片 (反射光与透射光的光强比约为 1:2), TM 为一片保护银反射镜. 为简化光路, 本文的 TM 与 HM 之间的距离在 $l_{pp}/2 \approx 0.6 \text{ m}$, 两者之间的距离 L 即为本文所需测量的任意绝对长度. 将 TM 固定在直线位移平台上, 可以通过移动 TM 改变 L 的大小. 由于本文所采用的纳米位移平台的量程只有 100 μm , 为了能够同时测量到两组干涉条纹, TM 的移动范围需控制在几十微米之内. 本文采用 KEYENCE 公司的 LK-G30 高精度激光位移传感器 DS 测量 TM 的位移量作为参考, 与本系统的测量结果进行比较, 其参考距离为 30 mm, 测量范围为 $\pm 5 \text{ mm}$, 分辨力为 0.01 μm .

反射回的参考光与测量光在 BS1 汇合并射向 BS2, 其中一部分透射过 BS2 被光电探测器 APD1 接收, 此为一阶相关信号; 另一部分被 BS2 反射至一块倍频晶体 PPKTP 上, 倍频后的信号被光电探测器 APD2 接收, 此为二阶相关信号. 本系统可以同时测量一阶和二阶相关信号并分别计算出二者的 Δ , 测量到的信号可由示波器 (LeCroy 104Xi) 接收并显示, 图 5 为示波器采集到的干涉条纹及纳米位移平台的驱动电压信号.

干涉条纹之间相对延迟 Δ 的计算方法如下: 如图 6 所示, 图 6(a) 为一阶相关信号, 图 6(b) 为二阶

相关信号, 图 6(c) 为纳米位移平台的驱动电压信号. 假设参考镜移动的量程为 D , t_3-t_4 为一个量程对应的时间, A 对应的干涉条纹分别为 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 在 t_1 时刻所形成的一阶和二阶相关信号, B 对应的干涉条纹分别为 $E_1(t)$ 和 $E_3(t)$ 在 t_2 时刻所形成的一阶和二阶相关信号可知延迟 Δ 为

$$\Delta = D \times (t_2 - t_1) / (t_4 - t_3), \quad (7)$$

则被测的任意绝对长度 L 为

$$L = [N \times c_n \times T_R + D \times (t_2 - t_1) / (t_4 - t_3)] / 2. \quad (8)$$

本文利用干涉条纹峰值之间的距离求取延迟 Δ , 每个条纹之间的幅值变化非常微小, 因此本方法的理论测量精度取决于参考镜的扫描精度, 由于本文采用高精度的纳米位移平台驱动参考镜, 所以理论测量精度可以达到纳米量级 [22]. 另外在实际应用中, 示波器分辨力、环境温湿度、大气压、尤其是空气折射率都会对测量精度产生影响.

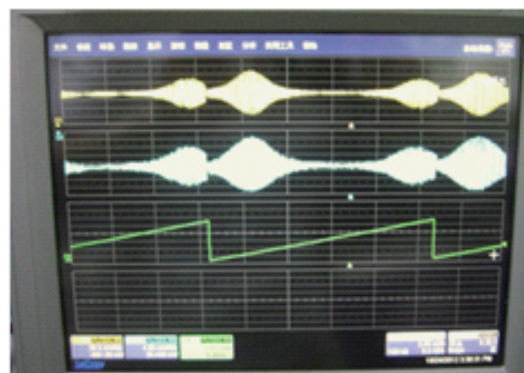
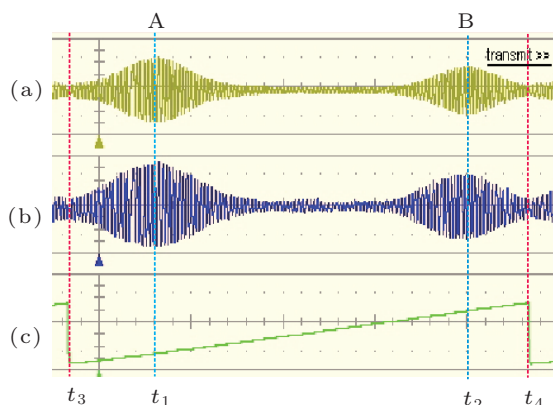


图5 示波器采集信号

图6 延迟 Δ 计算方法

本文中由于被测距离 L 比较小, 易得 $N = 1$. 实验中调节目标镜 TM 向右移动, 即 Δ 和 L 逐渐增大, 而 DS 的测量值 x 则逐渐减小. 利用 DS 测量 TM

的位移作为参考值, DS 的测量值每变化 $1\ \mu\text{m}$, 则进行一次测量, 共进行 30 次测量, TM 的总行程为 $30\ \mu\text{m}$, 分别利用 (7) 式求得一阶和二阶相关信号的延迟 Δ_1 和 Δ_2 , 并通过 (8) 式求得被测距离 L_1 和 L_2 , 将测量结果与 DS 的测量值 x 进行比较, 如图 7 所示. 可以看出随着 x 逐渐减小, 测量值 L_1 和 L_2 都会成比例增大, 呈现良好的线性度. 由于 TM 每次移动 $1\ \mu\text{m}$, 说明本系统的测量分辨力可在 $1\ \mu\text{m}$ 以内, 与传统 TOF 相比, 测量分辨力得到了很大的提高.

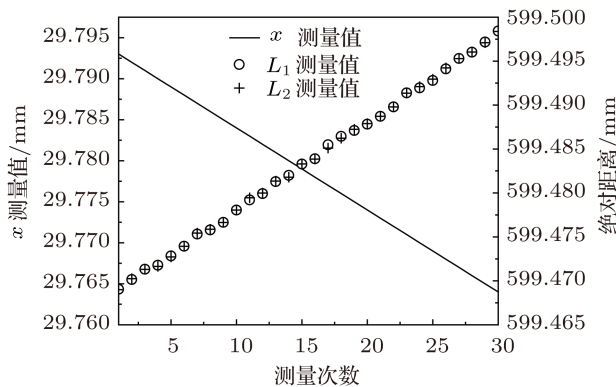


图7 被测距离 L 与参考值 x 的比较

将 L_1 和 L_2 的测量值与理论值进行比较可得测量误差, 如图 8 所示, 可以看出在 30 次测距实验中, 利用一阶和二阶相关信号求得被测距离的测距误差都在 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ 以内, 说明本系统的两种方法都可以保持良好的测量线性度, 并且具有很高的测量精度. 由于本文采用的纳米位移平台量程较小, 测量范围只有几十微米, 因此决定了 Δ 的测量值最大只有几十微米. 可适当选取更大量程的位移平台 (如直线电机等) 扩大参考镜的扫描范围或者通过提高光梳的重复频率 f_{rep} 从而缩短脉冲间距 l_{pp} , 当参考镜的扫描范围与脉冲间距 l_{pp} 相当时, 即 $\Delta_{\text{max}} \geq l_{\text{pp}}$, 则 Δ 的测量范围可以覆盖整个脉冲间距, 即 $0-l_{\text{pp}}$,

此时 (1) 式中的 N 和 Δ 都是任意大小的已知量, 则 L 为任意绝对长度, 即可实现任意长绝对测距.

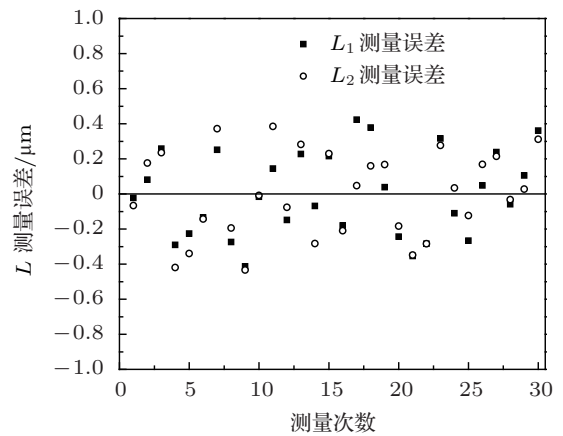


图8 一阶和二阶相关信号的测距误差

4 结论

本文研究了光梳多脉冲序列之间的时间相干性, 提出利用多脉冲序列干涉法进行 TOF 测距的方法, 并搭建了基于改进型 Michelson 干涉原理的任意绝对测长系统, 通过分别测量多脉冲序列的一阶和二阶互相关信号, 可以同时测量出两者的 TOF 时间差, 进而求得被测长度. 利用本系统进行了 $0.6\ \text{m}$ 的绝对测距实验, 实验结果表明本系统具有良好的测量线性度, 并且测距精度可达 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$. 该方法实现了一种新的高精度任意长绝对测距技术, 有极大的应用价值, 特别是在大尺度测距方面具有广泛应用前景, 如在测绘、大装备制造、空间探测、卫星编队等方面的测距应用.

后续可围绕完善数据处理以及对温湿度、气压、空气折射率等环境因素进行数据修正等工作进行, 并进一步提高测量精度和稳定性.

感谢中国计量科学研究院时间频率计量研究所的支持.

- [1] Zhang Y C, Wu J Z, Li Y Q, Jin L, Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao T, Jia S T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 113701
- [2] Yi L, Yuan J, Qi X H, Chen W L, Zhou D W, Zhou T, Zhou X J, Chen X Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1409
- [3] Zhang J T, Wu X J, Li Y, Wei H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100601 (in Chinese) [张继涛, 吴学建, 李岩, 尉昊赞 2012 物理学报 **61** 100601]
- [4] 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]

- [5] Fang Z J, Wang Q, Wang M M, Meng F, Lin B K, Li T C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5684 (in Chinese) [方占军, 王强, 王民明, 孟飞, 林百科, 李天初 2007 物理学报 **56** 5684]
- [6] 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, 宋友建, 胡明列, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 240601]
- [7] Wang G C, Yan S H, Yang J, Lin C B, Yang D X, Zou P F 2013 *Acta*

- Phys. Sin.* **62** 070601 (in Chinese) [王国超, 颜树华, 杨俊, 林存宝, 杨东兴, 邹鹏飞 2013 物理学报 **62** 070601]
- [8] Lee J H, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photonics* **4** 716
- [9] Berg van den S A, Persijn S T, Kok G J P 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 183901
- [10] Matsumoto H, Wang X N, Takamasu K, Aoto T 2012 *Appl. Phys. Express* **5** 046601
- [11] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [12] Salvadé Y, Schuhler N, Lévêque S, Floch L S 2008 *Appl. Optics* **47** 2715
- [13] Minoshima K, Matsumoto H 2000 *Appl. Optics* **39** 5512
- [14] Joo K N, Kim S W 2006 *Opt. Express* **14** 5954
- [15] Joo K N, Kim Y, Kim S W 2008 *Opt. Express* **16** 19799
- [16] Ye J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1153
- [17] Cui M, Schouten R N, Bhattacharya N, Berg van den S A 2008 *J. Eur. Opt. Soc-rapid* **3** 08003
- [18] Dong W, Takahashi S, Takamasu K, Matsumoto H 2011 *Opt. Express* **19** 4881
- [19] Kilpelä A, Pennala R, Kostamovaara J 2001 *Rev. Sci. Instrum* **72** 2197
- [20] Dong W, Takahashi S, Takamasu K, Matsumoto H 2009 *Opt. Express* **17** 7012
- [21] Dong W, Takahashi S, Takamasu K, Matsumoto H 2011 *Jpn. J. Appl.* **50** 022701
- [22] Dong W, Matsumoto H 2012 *J. Europ. Opt. Soc. Rap.* **7** 12050

Arbitrary and absolute length measurement based on femtosecond optical frequency comb*

Xing Shu-Jian¹⁾ Zhang Fu-Min^{1)†} Cao Shi-Ying²⁾

Wang Gao-Wen³⁾ Qu Xing-Hua¹⁾

1) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Division of Time and Frequency Metrology National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

3) (State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(Received 11 April 2013; revised manuscript received 15 July 2013)

Abstract

High-accuracy distance measurement plays an important role in many applications, such as industry measurement, Aerospace and scientific research. The continual development of laser ranging technique is always a frontier topic of geometric measurement, therefore this paper develops the application of femtosecond optical frequency comb for length measurement. Time-of-flight principle for distance measurement is widely used by pulse laser, however, achievable resolution reaches only a few millimeters at best due to the limited bandwidth of electronics. In this paper, the temporal coherence of multiple pulse train is analyzed, and an arbitrary and absolute length measurement system is set up based on modified Michelson interferometer by combining multiple pulse train interference and time-of-flight method. The timing difference is separately calculated by the first-order and second-order optical cross-correlation signals, therefore the absolute distance is calculated. An experiment is conducted by measuring a 60 cm length, and the measurement result is compared with a high precision laser displacement sensor. The result shows a good measuring linearity, and the measurement precision of $\pm 0.5 \mu\text{m}$ is achieved.

Keywords: femtosecond optical frequency comb, arbitrary and absolute length measurement, time-of-flight, multiple pulse train interference

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

DOI: 10.7498/aps.62.170603

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51105274), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120032130002), and State key laboratory of precision measuring technology and instruments (Grant No. pil1201).

† Corresponding author. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn