

# 基于飞秒激光平衡光学互相关的任意长 绝对距离测量\*

秦鹏 陈伟 宋有建<sup>†</sup> 胡明列 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2012年6月11日收到; 2012年6月26日收到修改稿)

大尺度、高精度的绝对距离测量在卫星编队飞行、自由空间通信、大尺寸工件检测等前沿应用中具有举足轻重的作用. 本文利用飞秒激光脉冲的飞行时间方法对一段 52 m 的大气传输路径进行了绝对距离测量. 通过平衡光学互相关技术探测目标反射脉冲与参考脉冲之间的时间误差, 并利用得到的平衡互相关电压信号反馈控制谐振腔长, 将脉冲间隔的整数倍精确锁定至往返距离, 最后由飞秒激光的重复频率确定目标反射脉冲的飞行时间. 这一测量方案有效地避免了直接光电探测造成的飞行时间分辨率的损失. 实验中, 采用工作在 1.04  $\mu\text{m}$  波段的高重复频率掺 Yb 锁模光纤激光器作为飞秒激光源, 在 1 s 的平均时间下获得了 12 nm 的测量精度.

**关键词:** 平衡光学互相关, 飞秒, 测距, 卫星编队飞行

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

## 1 引言

长度是国际单位制中七个基本物理量之一, 科技的进步和工业的发展都离不开精确的距离测量. 近年来, 随着卫星编队飞行、自由空间通信、大型工件制造等一系列需求的出现, 对距离测量的精度、量程等指标提出了更高的要求. 以卫星编队飞行为例, 由几颗甚至十几颗低成本微型航天器构成的编队星座, 可以实现合成孔径, 极大地拓展角度分辨率, 并且在同一时刻对同一目标进行立体探测, 从而实现传统单颗大卫星所不具备的强大功能, 在精确定位、导航、电子侦察、地球物理观测及深空探测等领域都有着非常重要的意义. 上述编队的实现, 最重要的一项技术基础就是卫星之间实时、高精度的距离测量. 为了获得最佳的角度分辨率, 卫星基线的长度一般在百米甚至公里量级; 为了保证星间基于光学干涉的合成孔径有效, 编队链路的

稳定性需要达到 nm 量级. 由此可以看出, 高精度、大尺度的绝对距离测量已经成为测距技术中的主要发展趋势之一.

传统的光学测距方法可以划分为脉冲飞行时间法<sup>[1,2]</sup>和干涉法<sup>[3]</sup>. 飞行时间法是一种非干涉的方法, 通过测定光脉冲在测量光路中的往返飞行时间, 将时间信息转化为距离信息. 这种方法测量范围大(可达 km 量级), 发射功率高, 抗干扰性强, 是大尺度范围测距的理想方法. 但是, 受到光电探测器响应带宽的限制, 飞行时间法的时间分辨率最高只能达到 ps ( $10^{-12}$  s) 量级, 对应 mm 量级的空间分辨率, 不能满足空间中飞行器高精度同步的要求. 干涉法将具有固定波长  $\lambda$  的单色波作为距离测量的尺子, 其分辨率可以达到 nm 量级. 但是由于干涉光场的强度随相位的变化具有周期性, 干涉法只能唯一确定测量  $\lambda/2$  范围内的距离, 这个范围称为干涉测量法的测距模糊范围. 当待测距离超过这个范围时, 只能通过增量式测量获取绝对距离信息.

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2011CB808101, 2010CB327604)、国家自然科学基金(批准号: 61078028, 61008015, 61205131, 11274239)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20110032110056)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yjsong@tju.edu.cn

这种方法需要标定测量的坐标原点,并且在测量过程中不允许中断,因而不适用于大尺度范围的绝对距离测量.

近年来,锁模飞秒激光器的原理和技术逐渐成熟<sup>[4-7]</sup>.其输出光束在时域上表现为脉冲宽度在 fs ( $10^{-15}$  s) 量级的周期性超短脉冲序列,在光谱域上对应等间隔排列、相位相干的单色谱线,称为光学频率梳<sup>[8]</sup>.飞秒激光作为测距的光源使用时,不仅可以利用其时域的周期性窄脉冲的特点来实现大尺度范围的飞行时间法测距,还可以利用其频域的相干谱线作为无数单色激光器的合成,从而获得高精度的干涉信息.2009年,Coddington等使用一对相位锁定的光学频率梳在 1.5 m 的测量窗口内实现 5 nm 的测距精度,能够追踪并锁定运动物体<sup>[9]</sup>.2010年, Lee 等利用飞秒激光脉冲本身具有的高时间精度,进行飞行时间绝对距离测量.实验中通过使用具有极高时间分辨本领的平衡光学互相关 (balanced optical cross-correlation, BOC) 技术,有效地避免了飞行时间测量中的直接光电探测带来的时间分辨率损失,在 1 s 的平均时间内,0.7 km 的绝对距离测量精度可以达到 7 nm<sup>[10]</sup>.2012年, van den Berg 等利用 1 GHz 重复频率的飞秒激光源输出的频率梳中的超过 9000 个单色波作为测距光源,通过测量独立频率梳中的每个单色频率分量在待测距离上引入的光谱位相延迟,得到了 1/30 波长的测量准确度,测量的模糊范围达到 15 cm<sup>[11]</sup>.

本研究利用工作在 1  $\mu\text{m}$  波段的掺 Yb 高重复频率飞秒激光源在实验室环境下开展了基于平衡光学互相关的高精度飞行时间距离测量实验.飞秒激光源工作在全正色散锁模域,利用振荡级直接获得 140 mW 的发射平均功率,脉冲重复频率为 183.4 MHz,经腔外色散补偿的脉冲宽

度为 150 fs.利用飞秒激光脉冲的飞行时间对一段 52 m 的大气传输路径进行了绝对距离测量,在 1 s 的平均时间下获得了 12 nm 的测量精度,测距系统的极限精度为 4 nm.

## 2 实验原理

### 2.1 平衡光学互相关

要衡量两个脉冲信号在时域的相对延时,互相关 (cross-correlation) 是一种常见的方法,其强度信号的数学表达式如下:

$$R(\Delta\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t + \Delta\tau)f_2(t)dt, \quad (1)$$

其中,  $\Delta\tau$  表示两待比较信号间的相对延时.由 (1) 式可见,互相关信号的强度是延时  $\Delta\tau$  的函数.对于光脉冲信号,互相关信号可以通过和频效应 (sum frequency generation, SFG) 获得.但是,从 (1) 式可以看出,互相关信号的强度分布不仅仅取决于两个基频信号间的延时,也受到信号强度波动的影响.

为了解决上述问题,从最初的单一互相关模型中发展出了平衡光学互相关的思想<sup>[12]</sup>:进行两路相同的平衡互相关过程,在其中一路互相关过程中人为引入固定的延时  $\Delta\tau'$  作为参考延时,再将两路互相关信号在平衡探测器中相减,从而可以抵消基频光的强度对互相关信号的影响,使得互相关信号的强度严格比例于两路基频光信号的初始相对延时.在此基础上,又出现了基于单和频晶体的平衡光学互相关方法<sup>[13]</sup>:正交偏振的入射飞秒脉冲在前后两个方向的和频过程中产生两路和频信号,而参考延时由晶体的双折射效应引入,其基本结构和工作原理如图 1 所示.

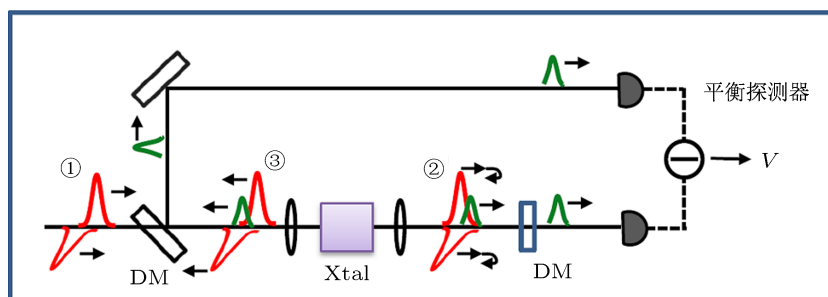


图 1 基于单晶体的平衡光学互相关原理 (DM, 双色镜; Xtal, 非线性晶体, 用于和频产生并提供基准延时; V, 平衡探测器输出的误差电压信号; ① 正交偏振的脉冲入射至 BOC; ② 第一次和频产生; ③ 第二次和频产生)

## 2.2 基于平衡光学互相关的绝对距离测量

飞秒激光器输出的超短激光脉冲序列经过偏振分束后, 分别经过参考平面与待测目标反射, 合束后作为平衡光学互相关器的两束正交偏振的入射脉冲. 利用平衡互相关器的输出信号反馈控制飞秒激光器的腔长, 可以调谐飞秒激光脉冲的间隔, 从而精确锁定参考脉冲与目标反射脉冲的到达时间, 即将脉冲间隔的整数倍锁定到目标反射脉冲的飞行时间. 通过测量锁模激光器的重复频率, 可以精确地确定脉冲间隔, 从而精确地确定测距光路的飞行时间. 具体地说, 设激光器的重复频率为  $f_r$ , 则其输出的脉冲序列的时间间隔为  $t_r = 1/f_r = l/c$ , 其中  $l$  为激光器腔内的光程,  $c$  为真空中光速. 脉冲在待测距离中的往返飞行时间为  $T_{rt} = 2nL/c$ , 其中  $L$  为待测距离,  $n$  为待测空间介质的折射率. 实现相位锁定之后, 测距脉冲的往返时间与脉冲序列的时间间隔满足  $T_{rt} = mt_r$  (其中  $m$  为正整数), 从而有  $L = mc/2f_r n$ . 从上式可以看出, 对于某一待测距离  $L$ , 满足相位锁定条件的重复频率  $f_r$  不止一个, 而且每一个重复频率  $f_r$  和倍数  $m$  是一一对应的. 对于一定的待测距离, 令可以实现相位锁定的相邻两个重复频率分别为  $f_{r1}$  和  $f_{r2}$ , 则

有  $m/f_{r1} = (m+1)/f_{r2}$ , 从而可得  $m = f_{r1}/\Delta f_r$ , 其中  $\Delta f_r = f_{r2} - f_{r1}$ . 得到  $m$  和对应的  $f_r$  后, 结合折射率信息, 就可以求出待测距离  $L$ .

## 3 实验系统、结果及分析

### 3.1 实验系统

本实验中所用的光源为自制的工作在全正色散域的非线型偏振旋转 (nonlinear polarization evolution, NPE) 锁模光纤激光器, 由波长为 976 nm 的二极管激光器抽运, 输出超短激光脉冲的中心波长为 1038 nm, 重复频率为 183.4 MHz, 平均功率为 140 mW, 其结构如图 2 中右侧细线框内所示. 该激光器为  $\sigma$  腔, 通过压电陶瓷 (piezo-electric transducer, PZT) 驱动全反镜, 可以控制飞秒激光器的重复频率. 考虑到 PZT 的有限拉伸量, 重复频率的改变范围为  $\pm 350$  kHz. 由于腔内没有任何色散补偿元件, 激光器直接输出的脉冲含有比较大的正啁啾, 脉冲的半极大全宽 (full width at half maximum, FWHM) 值为 622 fs. 通过 GT 干涉仪进行腔外色散补偿, 可以获得半极大全宽为 150 fs 的高斯脉冲序列, 其光谱和压缩后的自相关曲线如图 3 所示.

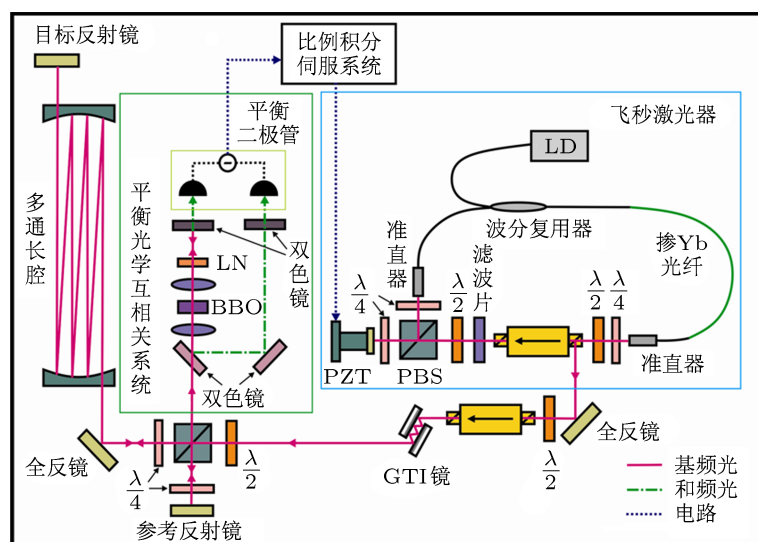


图 2 基于平衡光学互相关的飞行时间法测距实验系统

压缩后的光脉冲序列经偏振分束器 (polarization beam splitter, PBS) 分成偏振态相互垂直、其他参数相同的两束光, 分别进入参考光路和测量

光路. 为了突破光学平台长度的限制, 在测量光路引入了多通长腔, 光束在其间多次反射, 用来模拟光束在长距离范围内的传输. 返回的测量光与参考

光经合束后进入 BOC 系统, 该部分结构如图 2 中部细线框内所示. 其中, 和频晶体为偏硼酸钡 ( $\beta$ -Barium borate, BBO), 厚度 0.65 mm, 采取第二类相位匹配. BBO 晶体后面加入了厚度为 0.4 mm 的铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 晶体, 利用其双折射效应产生参考

延时. 两个方向的和频光用平衡光电二极管接收, 就可以得到关于两路基频光之间相对延时的平衡互相关强度信号. 当两路基频光在时间上比较接近时, 平衡互相关信号的强度与延时呈现线性关系. 实验中测得的平衡互相关信号如图 4(a) 所示.

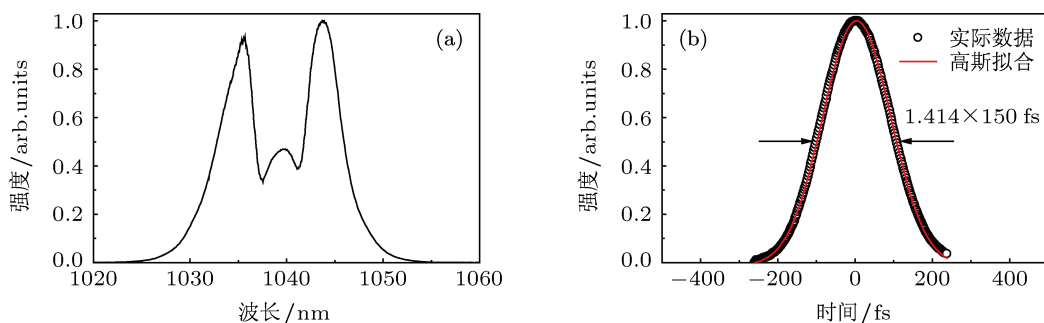


图 3 (a) 锁模激光器的光谱; (b) 自相关曲线

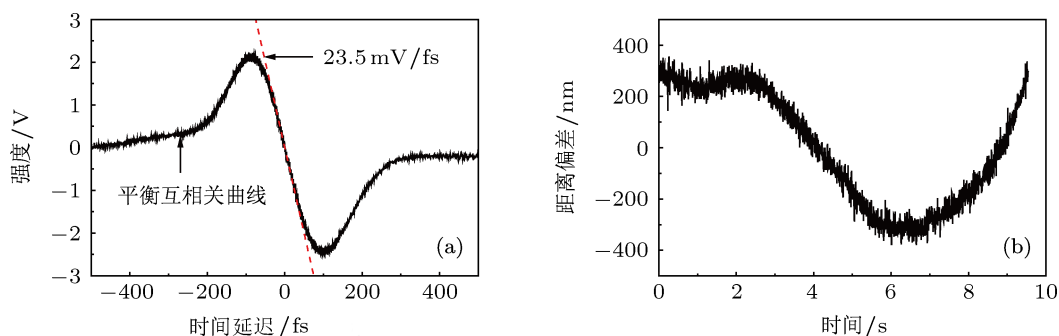


图 4 (a) 平衡互相关信号 (实线) 及其在零点的切线 (虚线); (b) 待测距离随时间的变化

### 3.2 实验结果及分析

在测量距离的过程中, 平衡光电二极管输出的电压信号经环路滤波和电压放大后, 施加到锁模激光器的 PZT 上, 通过驱动  $\sigma$  腔的反射镜来改变腔长, 就可以形成相位锁定的反馈环路, 受 PZT 的响应带宽限制, 整个环路的锁定带宽为 1 kHz. 这里, 我们始终将平衡互相关信号锁定到过零点的状态, 这样可以保证无背景的误差信号探测, 并且可以得到最高的灵敏度. 实现锁定以后, 通过频率计数器读取激光器的重复频率, 就可以精确地实时测定激光器的腔长. 通过测量两个相邻锁定点的重复频率, 就可以确定待测距离与激光器腔内光程的比值  $m$ , 从而精确地确定待测距离.

为了确定往返距离与激光器腔内光程间的倍数  $m$ , 需要在较大范围内调节激光器的重复频率, 并测量两个相邻锁定点之间的频率差. 本实验中选取了两个相邻锁定点, 分别以 5 ms 的采样间隔测得两组重复频率的序列. 两组重复频率数据的平均值分别为  $f_{r1} = 180720386.01996$  Hz 和  $f_{r2} = 183588018.961720$  Hz, 由此计算得到, 对于重复频率序列  $f_{r1}$ , 飞秒脉冲经待测目标反射的往返时间是此时脉冲间隔的 63 倍. 将上述结果及  $f_{r1}$  的实时测量序列代入待测距离的表达式, 就可以得到待测距离随的实时测量结果 (考虑到实验室的温度、气压情况, 通过 Edlen 公式取空气折射率  $n = 1.000266297$ ), 如图 4(b) 所示. 通过计算, 可以得到待测距离平均为 52.276803804 m. 考虑到待

测镜及多通单元的机械震动、空气的扰动的影响,待测距离会出现微小的随机变化.从测量结果中可以看出,待测距离在约  $\pm 500$  nm 的范围内变化,从而印证了基于平衡互相关距离测量的高灵敏度.

测距结果不确定度的主要影响因素之一是频率计数器 (Agilent 53220A) 所使用时基的稳定性.本实验中,计数器时基在 1 s 平均时间下的稳定性约为  $\sigma = 10^{-9}$ ,对应的频率不确定度为  $\Delta f_r = f_{r1} \times \sigma = 180.7 \text{ MHz} \times 10^{-9} \approx 0.18 \text{ Hz}$ ,对应的长度不确定度为  $|\Delta L| = \frac{m}{2} \times \frac{c}{f_{r1}^2} \times \Delta f_{r1} = \frac{63}{2} \times \frac{3 \times 10^8}{(180.7 \times 10^6)^2} \times 0.18 \approx 52 \text{ nm}$ ,即距离测量的不确定度约为 52 nm.这主要是受到计数器时基低稳定性的限制.通过将计数器溯源到原子钟 (在 1 s 平均时间下的相对稳定性可达到  $\sigma = 10^{-12}$ ) 可以有效地减小测量结果的不确定度.

影响测距结果不确定度的另一主要因素是空气折射率的不确定度,其在单位待测长度上的引入的误差约为十几 nm,且随待测距离的长度线性增长<sup>[14]</sup>.考虑到高精度距离测量主要用于卫星编队等空间任务,环境为真空,故本文对空气折射率对不确定度的影响暂时不予考虑.

测距结果的精度取决于相位锁定的稳定性,这与平衡互相关曲线中线性部分的斜率有十分紧密

的联系:该部分的斜率越大,反馈环路的灵敏度越高,相位锁定就越稳定.本实验中,测得的互相关曲线在零点附近的斜率高达 23.5 mV/fs,如图 4(a) 中虚线所示.此外,相位锁定的稳定性可以通过锁定之后的 BOC 的输出误差信号来定量表示.图 5(a) 中分别列出了系统未锁定及系统锁定情况下的残余误差信号 (采样间隔为 0.25 ms).从图中可以看出,系统未锁定的情况下,误差信号处于随机游走 (random walk) 状态,在很大的范围内无规则变化;系统锁定之后,残余误差信号的幅度明显减小,约束在零点附近很小的范围内.艾伦偏差分析可以用于确定反馈系统在不同的时间尺度下的相位锁定的不稳定性.从系统相位锁定后误差信号的艾伦偏差 (图 5(b) 中方点) 可以看出,随着积分时间的增加,艾伦偏差在对数坐标系中以  $-0.5 \text{ dB/倍频程}$  的斜率单调下降,说明 BOC 误差信号具有白噪声特性.当平均时间为 10 ms 时,测距结果的精度为 40 nm;平均时间为 100 ms 时,测距结果的精度为 23 nm;当平均时间达到 1 s 时,测距结果的精度达到 12 nm.需要注意的是,从 64 ms 平均时间处开始,艾伦偏差的数值与之前的数值不在一条直线上,这主要是由总体采样时间 (8 s) 相对于平均时间过短造成的误差.通过增加采样数据量,就可以解决这一问题.

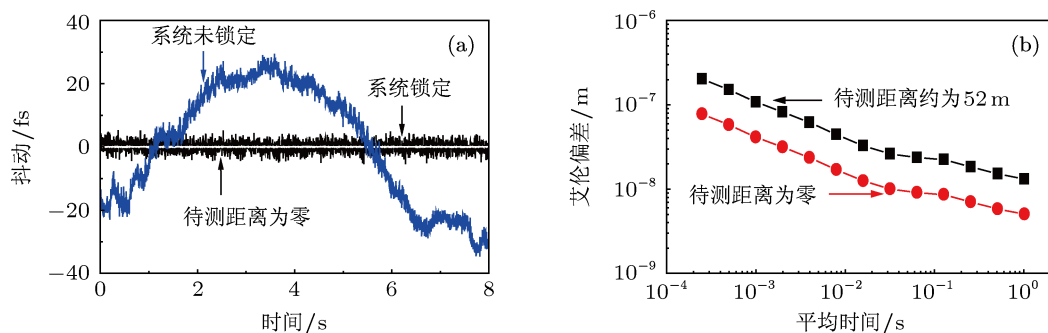


图 5 (a) 系统未锁定、系统锁定 (如箭头所示) 及待测距离为零 (中央白线) 时的残余误差信号; (b) 待测距离约为 52 m (方点) 时及待测距离为零 (圆点) 时的艾伦偏差

为了确定系统的极限分辨率,本实验中对待测距离为零时,相位锁定后的残余误差信号也进行了测量和分析.这种情况下,测量臂与参考臂等长,通过反馈控制锁定两臂的长度差,从而反映出系统的噪声基底 (包括光学噪声和电学噪声等),如图 5(a) 中白色信号所示.此时误差信号的艾伦偏差

如图 5(b) 中的圆点所示.从图中可以看出,当平均时间为 10 ms 时,系统的极限精度为 14 nm;平均时间为 100 ms 时,系统的极限精度为 7 nm;当平均时间达到 1 s 时,系统的极限精度可达到 4 nm.同样,这里由于采样数据时间较短,从 64 ms 平均时间处开始,艾伦偏差的数值与真实值相比偏大.通过艾

伦偏差的走势可以看出, 当平均时间为 1 s 时, 系统真正的极限精度接近 1 nm.

## 4 结论

本文基于高时间分辨率的飞秒激光平衡光学互相关技术实现了长程、高精度的飞行时间绝对

距离测量. 在实验中, 基于自制的工作在 1.04  $\mu\text{m}$  波段的高重复频率飞秒激光源, 对约为 52 m 的空间距离进行了实际测量, 当平均时间为 1 s 时, 获得了 12 nm 的测量精度. 当待测距离为零时, 测得系统的极限精度为 4 nm. 该实验结果对于卫星编队飞行等高端空间技术领域有重要的潜在应用价值.

- 
- [1] Smullin L D, Fiocco G 1962 *Nature* **194** 1267
  - [2] Bender P L, Currie D G, Poultney S K, Alley C O, Dicke R H, Wilkinson D T, Eckhardt D H, Faller J E, Kaula W M, Mulholland J D, Plotkin H H, Silverberg E C, Williams J G 1973 *Science* **182** 229
  - [3] Bobroff N 1993 *Meas. Sci. and Tech.* **4** 907
  - [4] Wise F W, Chong A, Renninger W H 2008 *Laser Photon. Rev.* **2** 58
  - [5] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘博文, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
  - [6] Song Y J, Hu M L, Liu Q W, Li J Y, Chen W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5045 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘庆文, 李金延, 陈伟, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 5045]
  - [7] Cao S Y, Zhang Z G, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2971 (in Chinese) [曹士英, 张志刚, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 2971]
  - [8] Diddams S A 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** B51
  - [9] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photon* **3** 351
  - [10] Lee J, Kim Y J, Lee K, Lee S, Kim S W 2010 *Nat. Photon* **4** 716
  - [11] van den Berg S A, Persijn S T, Kok G J P, Zeitouny M G, Bhattacharya N 2012 *Physical Review Letters* **108** 183901
  - [12] Schibli T R, Kim J, Kuzucu O, Gopinath J T, Tandon S N, Petrich G S, Kolodziejewski L A, Fujimoto J G, Ippen E P, Kaertner F X 2003 *Opt. Lett.* **28** 947
  - [13] Kim J, Chen J, Zhang Z, Wong F N C, Kärtner F X, Loehl F, Schlarb H 2007 *Opt. Lett.* **32** 1044
  - [14] Hyun S, Kim Y J, Kim Y, Jin J, Kim S W 2009 *Measurement Science and Technology* **20** 095302

# Long range absolute distance measurement based on femtosecond laser balanced optical cross-correlation\*

Qin Peng Chen Wei Song You-Jian<sup>†</sup> Hu Ming-Lie Chai Lu Wang Ching-Yue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 11 June 2012; revised manuscript received 26 June 2012)

## Abstract

High-precision distance measurement in a long range is critical for many advanced applications, such as satellite formation flying, free space optical communication and large scale machining. A 52 m absolute distance measurement in free space based on time of flight of femtosecond laser is demonstrated. The timing offset between target-reflected and the reference pulses is precisely characterized by balanced optical cross-correlation method. The balanced cross correlation signal is used for the feedback control of the cavity length and tightly locks the distance under test to multiple of pulse separation. As a result, the time of flight of the target-reflected pulse is determined by the repetition rate of the femtosecond laser, which effectively avoids the loss of timing resolution caused by direct access of pulse time-of-flight from photo-detection. In the experiment, a Yb -doped high repetition rate mode-locked fiber laser working at 1.04  $\mu\text{m}$  is used as a femtosecond laser source, and a measurement precision of 12 nm is achieved in an average time of one second.

**Keywords:** balanced optical cross-correlation, femtosecond, distance measurement, satellite formation flying

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

---

\* Project supported by the National Basic research Program of China (Grant Nos. 2011CB808101 and 2010CB327604), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61078028, 61008015, 61205131, 11274239), and the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20110032110056).

<sup>†</sup> E-mail: yjsong@tju.edu.cn