

# 全保偏光纤化的双光梳高精度绝对测距系统

许立明 宋有建 梁 飞 师浩森 胡明列 王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 报道了一种实用化的飞秒激光绝对测距系统。基于两台自由运转的全保偏光纤飞秒激光器的非线性光学采样, 可以实现高更新速率、高精度的任意长绝对距离测量。实验演示了对位于约 2 m 处的合作目标的绝对测距。在 2 kHz 更新率下实现了 3.3  $\mu\text{m}$  的测距精度。通过连续测量取平均, 在 100 Hz 时, 测距精度达到 0.8  $\mu\text{m}$ 。测距非模糊范围为 2.08 m。辅以精度为米级的粗略测距, 就可以有效地扩展量程, 实现任意长度、微米级精度的绝对测距。由于采用了全保偏光纤化的飞秒激光光源设计, 该测距系统具有环境稳定性好、集成化、免维护等突出优势, 在大尺寸工业制造、航空航天、遥感探测等领域有重要的应用前景。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光; 绝对距离测量; 双光梳; 保偏

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s212001

## All Polarization Maintaining Fiber Based Dual-Comb High Precision Absolute Distance Measurement System

Xu Liming Song Youjian Liang Fei Shi Haosen Hu Minglie Wang Qingyue

*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** We demonstrate a practical femtosecond laser absolute ranging system. High update rate and high precision arbitrary distance measurement can be realized based on nonlinear optical sampling between two free running polarization maintaining femtosecond fiber lasers. A ranging experiment for a cooperative target at about 2 m distance is demonstrated. A 3.3  $\mu\text{m}$  ranging precision at 2 kHz update rate is realized. The ranging precision can reach 0.8  $\mu\text{m}$  at 100 Hz update rate by averaging of continuous measurements. The ranging ambiguity is 2.08 m, which can be removed by introducing a coarse measurement with about 1 meter precision, resulting in an arbitrary ranging with micrometer precision. Due to the usage of all-polarization maintaining fiber based femtosecond laser sources, this ranging system is advantageous of high environmental stability, high compatibility, and maintenance free operation, which is attractive for a number of applications, such as large-scale manufacturing, aerospace engineering and remote sensing.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond lasers; absolute distance measurement; dual comb; polarization maintaining

**OCIS codes** 120.1880; 140.4050; 320.7090

## 1 引 言

远量程、高精度的激光绝对距离测量在大尺寸工业制造、遥感探测、航空航天等领域具有重要的应用。目前, 基于纳秒级调 Q 巨脉冲的飞行时间测距技术, 激光绝对测距的量程已经可以达到公里尺度, 但是受到

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家 863 计划 (2013AA122602)、国家自然科学基金 (61205131, 11274239, 61322502)、国家 973 计划 (2011CB808101, 2010CB327604)、高等学校博士学科点专项科研基金 (20120032120071)

作者简介: 许立明 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光绝对距离测量方面的研究。E-mail: sdxuliming@126.com

导师简介: 宋有建 (1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事飞秒激光技术方面的研究。E-mail: yjsong@tju.edu.cn (通信联系人)

光电探测单元响应时间的限制,其测量精度很难突破毫米量级。基于光学干涉的方法,测量精度能够达到纳米量级,然而由于受到增量式的测量原理的限制,无法实现绝对测距。虽然可以通过外加射频调制的方法拓展测距量程,然而其前提条件是射频测距的精度满足光学干涉测距的动态范围,匹配难度大,结构复杂。

近年来,飞秒激光器<sup>[1-2]</sup>作为一种新型的宽带相干光源,被引入到距离测量领域中,给高精度、大量程的绝对距离测量带来了重大突破<sup>[3]</sup>。飞秒激光具有极高的时间分辨本领,可以作为瞬态响应的快门,在公里尺度上实现纳米精度的绝对测距,测量值可以在线溯源。同时,飞秒激光在频率域由等间隔排列的相干梳齿构成,可以实现多波长干涉测距,在保持高精度的同时,有效拓展测距量程。2000年,日本计量局首次演示了飞秒激光在240 m长隧道中的绝对距离测量<sup>[4]</sup>。2010年,韩国高等科技研究院在开放空间进行了飞秒激光飞行时间绝对距离测量实验,在0.7 km的尺度上获得了150 nm的测量精度<sup>[5]</sup>。2012年,荷兰计量局演示了飞秒激光频率梳多波长测距,测量精度优于 $\lambda/30$ <sup>[6]</sup>。国内,清华大学、天津大学、中国科学院光电研究院、中国计量科学研究院、北京理工大学、国防科学技术大学等单位都开展了飞秒激光测距技术的研究<sup>[7-14]</sup>。其中,天津大学在52 m的自由空间实现了12 nm精度的绝对距离测量<sup>[7]</sup>。

与单飞秒激光器测距相比,利用双飞秒激光器,即双梳结构,采用光学等效采样原理,可以有效提升测量的更新速度,并减小测量盲区,从而跟踪动态目标。2012年,美国标准局基于两台自由运转的飞秒激光频率梳,实现了微米级的测量精度,更新速率为7 kHz<sup>[15]</sup>。2014年,清华大学对双梳测距的探测方法进行改进,利用光学互相关方法探测脉冲飞行时间,在2 kHz更新速率下获得了1.48  $\mu\text{m}$ 的测量精度<sup>[16]</sup>。

随着飞秒激光在工业测距中的应用前景日渐凸显,迫切需要研发集成化、低成本、免维护、环境稳定性好的飞秒激光绝对测距系统。目前的飞秒激光测距报道通常采用光纤飞秒激光器作为测距光源。然而,普通光纤激光器对外界应力、温度等环境因素敏感,环境因素改变所引入的随机偏振模色散会导致飞秒激光器的重复频率与脉冲宽度的随机变化,从而直接引入测距误差,使这种测距装置难以应用于复杂的工作环境。本文提出一种基于全保偏光纤结构的双梳飞秒激光绝对测距系统,利用光学互相关方法探测脉冲飞行时间。

## 2 测距原理及装置

基于双梳结构的绝对距离测量原理与等效采样示波器类似,如图1(a)所示。采用两台具有一定重复频率差的飞秒激光器,其重复频率分别为 $f_r$ 和 $f_r + \Delta f_r$ 。将重复频率为 $f_r$ 的激光器作为测量激光器,重复频率为 $f_r + \Delta f_r$ 的激光器作为采样激光器。采样激光器每隔一个脉冲周期 $1/(f_r + \Delta f_r)$ 对测量脉冲进行一次采样,并通过平方率光电探测器产生一个采样点,采样带宽为 $f_r + \Delta f_r$ 。同时,由于两个脉冲序列之间存在重复频率差 $\Delta f_r$ ,采样脉冲每经过一个周期就会相对测量脉冲产生一个时间位移 $\Delta T_r$ :

$$\Delta T_r = \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_r + \Delta f_r} \approx \frac{\Delta f_r}{f_r^2}. \quad (1)$$

$\Delta T_r$ 相当于采样时间分辨率,为了保证采样信号中有足够的采样点还原测量脉冲, $\Delta T_r$ 必须远小于脉冲宽度 $\tau$ ,因此要求 $\Delta f_r$ 远小于 $f_r$ 。经过 $\Delta t = 1/\Delta f_r$ 时间后,采样脉冲的第 $N+1$ 个脉冲与测量的第 $N$ 个脉冲重合,完成对信号光的一次完整扫描,在探测器上获得与测量脉冲形状相同的采样信号,但是采样信号的脉冲宽度比测量光脉冲展宽了 $N$ 倍。 $N$ 满足:

$$N = \frac{T_r}{\Delta T_r} = \frac{f_r}{\Delta f_r}. \quad (2)$$

这一采样过程将 $1/f_r$ 时间内的测量脉冲信息在 $\Delta t$ 时间内由采样信号重构出来,相当于将时间拉长了 $N$ 倍,称为等效采样。与实时采样相比,等效采样原理可以突破奈奎斯特采样定理的约束,将快速变化的、光电探测器无法直接探测的光脉冲信号转化为光电探测器可以响应的慢变化信号,从而精确地还原脉冲时间信息。

为了将等效采样原理应用于绝对距离测量,将测量光脉冲与采样光脉冲合束并聚焦至非线性晶体中,基于和频产生效应实现非线性光学采样<sup>[7, 15-16]</sup>,经光电探测分别得到由合作靶标和参考镜反射的两个脉冲的等效采样信号,通过提取脉冲包络的峰值,得到两个等效采样信号的飞行时间 $t_{tar}$ 和 $t_{ref}$ ,如图1(b)所示,则待测距离可表示为

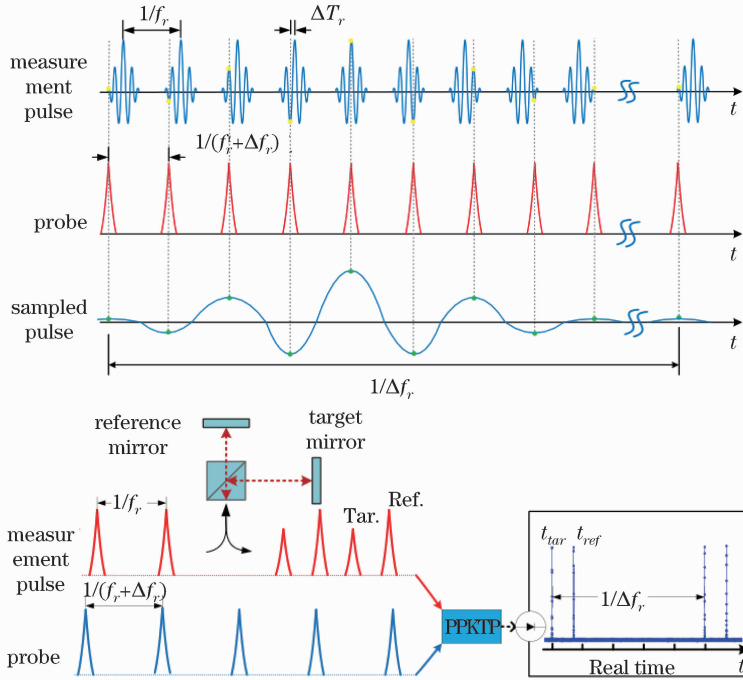


图 1 测距原理。(a) 等效光学采样；(b) 双梳测距

Fig. 1 Absolute distance ranging principle. (a) Optical equivalent sampling; (b) dual comb ranging

$$L = \frac{c}{2n_g} \cdot \frac{t_{tar} - t_{ref}}{N}. \quad (3)$$

测距激光源采用了两台参数完全相同的工作在 1550 nm 通信波段的孤子锁模的掺铒光纤飞秒激光器，其结构如图 2(a)所示。一台作为测距光源，重复频率为  $f_r = 72.280$  MHz；另一台作为采样光源，重复频率为  $f_r + \Delta f_r = 72.282$  MHz，两台激光器均为自由运转状态，重复频率差  $\Delta f_r \approx 2$  kHz。光纤激光器基于  $\sigma$  腔结构，均采用保偏光纤器件，利用半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模，SESAM 通过折射率与光纤纤芯匹配的紫外固化胶直接粘贴在光纤环形器的反射端的 FC/PC 陶瓷插芯上，从而保持全光纤化的结构，使光束约束在光纤波导中传输，不经过任何自由空间光路，结构紧凑，抗干扰能力强。唯一的自由空间光路是位于其中一台激光器内的一段 5 cm 长的光学延迟线，目的是实现两台激光器的重复频率差的精确调谐。两台激光器均采用保偏光纤耦合器输出，输出端与保偏掺铒光纤放大器熔接，放大器直接输出的激光平均功率为 20 mW，脉冲宽度为 1 ps，脉冲的自相关曲线与光谱如图 2(b)、(c) 所示。两台飞秒激光振荡器共用一台由保偏尾纤输出的平均功率为 200 mW、波长为 976 nm 的激光二极管作为抽运源，抽运光经过 50:50 保偏光纤耦合器分布至两台振荡器。同样地，两台飞秒激光放大器共用一台由保偏尾纤输出的平均功率为 400 mW、波长为 976 nm 的激光二极管作为抽运源。

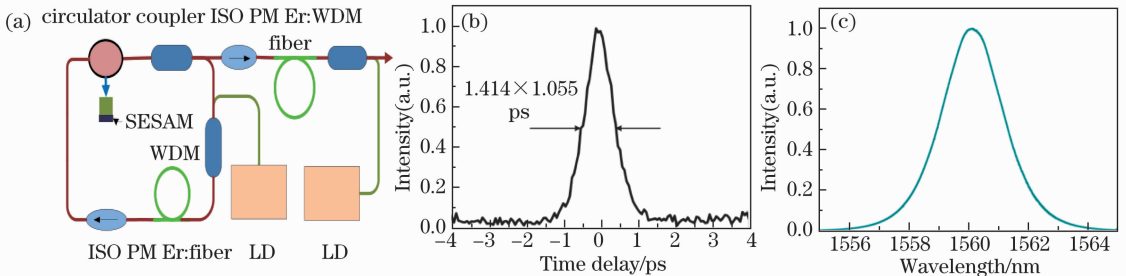


图 2 测距光源。(a) 保偏光纤飞秒激光器；(b) 脉冲自相关曲线；(c) 脉冲光谱

Fig. 2 Setup of the laser for ranging. (a) Femtosecond polarization maintaining fiber laser; (b) autocorrelation trace; (c) optical spectrum

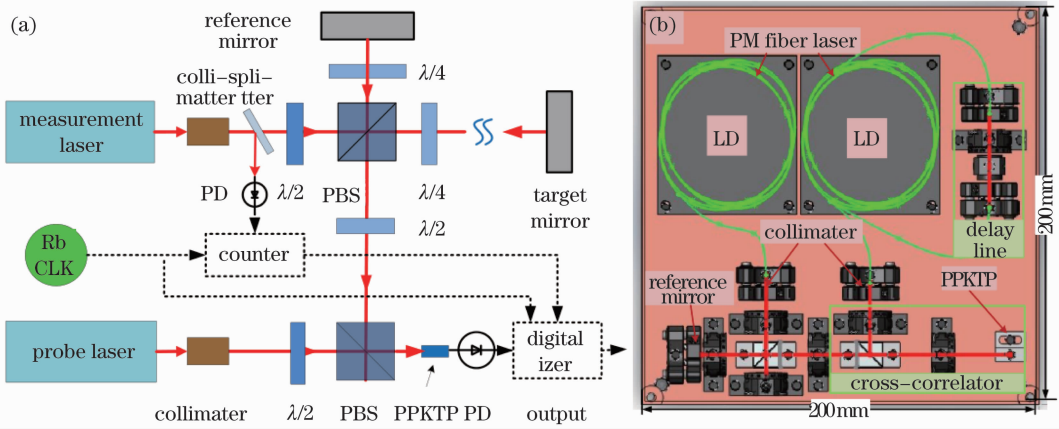


图3 测距实验装置 (a)测距系统;(b)测距光学模块

Fig. 3 Setup of the laser ranging system. (a) Ranging system; (b) optical module

测距系统的实验装置如图3(a)所示。测距光源输出的超短激光脉冲序列经光纤准直器准直后,由偏振分束器(PBS)分成偏振方向垂直的两束光,一束发射至参考镜,一束发射至目标角锥镜,两束光返回后与本地的采样光学脉冲经偏振分束器合束。合束脉冲聚焦至二类相位匹配的周期极化铌酸锂(PPKTP)晶体中,基于和频产生效应进行非线性光学采样。测距系统的光学模块如图3(b)所示,可以集成在 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的底板上。采样光信号经过高速、低噪声光电探测器转化为电脉冲,经滤波后,由一台14位100 MHz的数字仪(PXIe-5122, National Instrument)进行离散化处理。离散化的等效采样脉冲经过脉冲包络提取、寻峰等数值算法,提取脉冲飞行时间,最后计算得到待测目标的绝对距离。

### 3 测距实验结果

为了将该装置应用于绝对距离测量,首先需要评价飞秒激光器的重复频率稳定性。当飞秒激光器处于自由运转状态时,其重复频率受环境因素影响很大,长期稳定性较差。为了改善其重复频率稳定性,往往利用锁相环将激光器的重复频率参考至外加频率基准,然而这会增加系统的复杂度,很难小型化。通过对激光器的重复频率稳定性的测量可知,飞秒激光器的重复频率具有很好的短期稳定性<sup>[15]</sup>。本实验中所使用的飞秒光源,在1 s的门时间内,其相对稳定度由于 $2\times 10^{-9}$ 。这一相对稳定性水平已经远远小于大气折射率的估计对于测距结果带来的 $10^{-7}$ 量级的不稳定性,因此,只要以小于1 s的门宽度更新激光器的重复频率值,即可有效地补偿重复频率不稳定性对距离测量引入的误差。激光脉冲的重复频率由参考到铷原子钟的计数器直接采集,从而保证测得的距离值可溯源至频率标准。

利用该双光梳测距系统对2.08 m处的固定目标反射镜进行了测距实验,测距结果如图4所示。图4(a)给出了积分时间由0.5 ms至0.1 s连续变化时的测距阿伦(Allan)方差。单次测量最快的更新时间为0.5 ms,由两台激光器的2 kHz的重复频率差决定,测量精度为 $3.3\ \mu\text{m}$ 。当积分时间达到64 ms时,测距精度可以提高至 $0.53\ \mu\text{m}$ ,对应于128次单次测量平均后的结果。进一步增加平均时间,测距精度不再提高。图4(b)给出了对相同目标进行80 s连续测量的实验结果。单次测量的积分时间为10 ms,其测量均值由曲线中的黑色数据点表示,误差条给出了10 ms测量窗口内的测量均值的标准差。

该装置的测距非模糊范围为2.08 m,由激光器的等效谐振腔长度决定。由于测距精度为米量级的无线电或光学飞行时间测距仪已经非常成熟且价格低廉,很容易与飞秒激光测距系统进行集成,因此通过分阶段的测量方法,传统的测距方法作为粗测,可以极大地拓展双梳飞秒激光绝对测量系统的量程,并实现任意长度的精度为微米量级的绝对距离测量。

目前,目标距离在谐振腔等效腔长的整数倍附近会产生一个约1 mm的测量死区。造成死区的原因是脉冲具有约1 ps的宽度,在谐振腔等效腔长的整数倍附近,测距脉冲与参考脉冲会产生交叠,导致提取脉冲包络算法失效。为了避免发生这种情况,可利用两个相同的光电探测器对参考脉冲信号和测量脉冲信号分别进行探测。

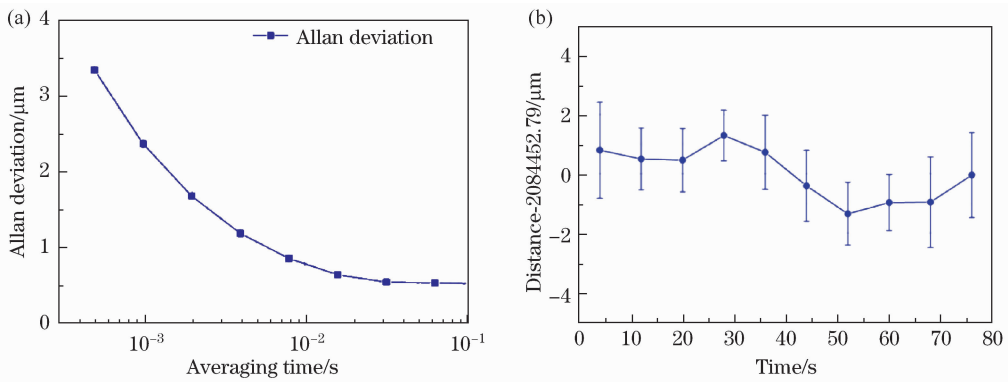


图 4 测距结果。(a)测量精度;(b)测距长期稳定性

Fig. 4 Experimental results for ranging. (a) Ranging precision;(b) long term stability test

## 4 结 论

本文针对高精度、远量程的绝对距离测量在工业上的应用需求,报道了一种实用化的飞秒激光飞行时间绝对测距系统。基于两台自由运转的光纤飞秒激光器的非线性光学采样原理实现绝对测距,具有量程大、精度高、更新速度快等突出特点。实验演示了对位于约 2 m 处的合作目标的绝对测距。在 2 kHz 更新率下实现了 3.3 μm 的测距精度。通过连续测量取平均,在 100 Hz 时,测距精度达到 0.8 μm。由于采用了全保偏光纤化的飞秒激光光源设计,该测距系统具备了极佳的环境稳定性,可以在复杂的工作环境中运转,并具备集成度高、免维护等优势。该测距系统的光学模块尺寸为 20 cm×20 cm。目前,测距系统的数据采集与处理由商用的数字化仪完成,这部分功能完全可以由成熟的现场可编程门阵列(FPGA)技术实现,从而形成便携式的飞秒激光测距仪。

## 参 考 文 献

- Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013,40(1): 0101001.  
柴路,胡明列,方晓惠,等.光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J].中国激光,2013,40(1):0101001.
- Wise Frank, Chong Andy, Renninger H William. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(1-2):58-73.
- Newbury R Nathan. Searching for applications with a fine-tooth comb[J]. Nature Photon, 2011, 5(4):186-188.
- Minoshima Kaoru, Matsumoto Hirokazu. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. Appl Opt, 2000, 39(30): 5512-5517.
- Lee Joohyung, Kim Young-Jin, Lee Keunwoo, *et al.*. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. Nature Photon, 2010, 4(175):716-720.
- Berg S A van den, Persijn S T, Kok G J P, *et al.*. Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(18):183901.
- Qin Peng, Chen Wei, Song Youjian, *et al.*. Long range absolute distance measurement based on femtosecond laser balanced optical cross-correlation [J]. Acta Physica Sinica,2012,61(24):240601.  
秦鹏,陈伟,宋有建,等.基于飞秒激光平衡光学互相关的任意长绝对距离测量[J].物理学报,2012,61(24):240601.
- Wang Guochao, Yan Shuhua, Lin Cunbao, *et al.*. Overview of large scale precision ranging by femtosecond optical frequency comb[J]. Optical Technique,2012,38(6):670-677.  
王国超,颜树华,林存宝,等.基于飞秒光学频率梳的大尺寸精密测距综述[J].光学技术,2012,38(6):670-677.
- Xu Yan, Zhou Weihu, Liu Deming, *et al.*. Absolute distance measurement based on the optical frequency comb of a femtosecond laser[J]. Opto-Electronic Engineering ,2011,38(8):79-83.  
许艳,周维虎,刘德明,等.基于飞秒激光器光学频率梳的绝对距离测量[J].光电工程,2011,38(8):79-83.
- Wu Tengfei, Liang Zhiguo, Yan Jiahua. Theoretical study on air dispersion compensation in the distance measurement of femtosecond pulsed laser[J]. Chinese J Lasers , 2012,39(12):1208004.  
武腾飞,梁志国,严家骅.飞秒激光测距中空气色散补偿理论研究[J].中国激光,2012,39(12):1208004.
- Wu Xuejian, Li Yan, Wei Haoyun, *et al.*. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2012, 49(3):030001.  
吴学健,李岩,尉昊赞,等.飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J].激光与光电子学进展,2012,49(3):030001.
- An Weining, Zhang Fumin, Wu Hanzhong, *et al.*. Absolute distance measurement method based on frequency-domain interference using a femtosecond optical frequency comb[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014,35(11):2458-2465.  
安慰宁,张福民,吴翰钟,等.一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J].仪器仪表学报,2014,35(11):2458-2465.

- 13 Shen Zhenmin, Liu Hongying, Lan Tian, *et al.*. Dispersion and compensation of femtosecond laser pulses in the atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 940-946.  
沈振民, 刘红影, 蓝天, 等. 飞秒激光脉冲在大气中的色散及补偿[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 940-946.
- 14 Qin Peng, Song Youjian, Hu Minglie, *et al.*. The measurement of arbitrary distance based on flight-time of femtosecond pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 37(8): 0803004.  
秦 鹏, 宋有建, 胡明列, 等. 基于飞秒脉冲飞行时间的任意长绝对距离测量[J]. *中国激光*, 2012, 37(8): 0803004.
- 15 Liu Tze-An, Newbury R Nathan, Coddington Ian. Sub-micron absolute distance measurements in submillisecond times with dual free-running femtosecond Er fiber-lasers[J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18501-18509.
- 16 Zhang Hongyuan, Wei Haoyun, Wu Xuejian, *et al.*. Absolute distance measurement by dual-comb nonlinear asynchronous optical sampling[J]. *Opt Express*, 2014, 22(6): 6597-6604.

栏目编辑: 何卓铭