

# 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法

陶 龙 刘志刚 吕 涛 邓忠文 龚海

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 频率扫描干涉仪对测量过程中光程差的漂移非常敏感,目标镜的微小位移会被放大几千倍,使得测量结果严重失真,因此必须消除或减弱漂移误差。针对现场测量中目标镜的低频振动或缓慢漂移,根据光频连续正反向扫描测量值漂移误差放大项大小近似相等、符号相反的特性,提出了一种光频连续正反向快速扫描的漂移误差补偿方法,并进行了频率扫描干涉仪漂移误差补偿实验,分析对比补偿前后的实验结果,验证了该方法的可行性。实验结果表明,在测量距离约 1543.3 mm 处,目标镜振动频率为 4.7 Hz,振幅为 1  $\mu\text{m}$ ,采用补偿后,连续 40 次采样测量的标准差由补偿前的 51.9  $\mu\text{m}$  下降到 8  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 测量;频率扫描干涉仪;漂移误差

中图分类号 TB921 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0212002

## Drift Error Compensation Method of Frequency Sweeping Interferometer by Consecutive Forward and Reverse Optical Frequency Scanning

Tao Long Liu Zhigang Lü Tao Deng Zhongwen Gong Hai

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** Frequency sweeping interferometer is very sensitive to drift of optical path difference. Drift error is multiplied by an amplification factor to thousands of times, seriously affecting the measurement results, so it is necessary to remove or reduce drift error. For low-frequency vibration or slow drift of objective mirror under laboratory environment, the amplified drift errors of two consecutive forward and reverse scanning measurements are approximately equal in quantity but opposite in sign. According to these characteristics, a drift error compensation method by consecutive forward and reverse optical frequency scanning is proposed. Then, validation experiment is established to prove the feasibility of this method for vibration of objective mirror with frequency of 4.7 Hz and amplitude of 1  $\mu\text{m}$ . The experimental results show that the standard deviation of 40 measurements decreases from 51.9  $\mu\text{m}$  to 8  $\mu\text{m}$  with distances up to 1543.3 mm, after applying this compensation method.

**Key words** measurement; frequency sweeping interferometer; drift error

**OCIS codes** 120.3180; 120.7280; 140.3600; 280.3400

## 1 引 言

可调谐半导体激光器的频率扫描干涉测距技术(FSI)精度高、体积小、价格适中,已应用于大型强子对撞器超环面探测器(ATLAS)的装配精度检测<sup>[1-4]</sup>和多卫星编队飞行时相对距离的测量<sup>[5]</sup>等领

域。而FSI对光频扫描过程中目标镜的振动漂移非常敏感。扫描测量时目标镜的振动漂移产生的干涉条纹与光频扫描产生的干涉条纹相混淆,导致最终测量结果中的漂移误差是实际漂移误差的几千倍,不能真实反映测量结果。

收稿日期: 2013-08-01; 收到修改稿日期: 2013-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(50975225、50935006)、制造过程测试技术-省部共建教育部重点实验室开放课题(10zxzk05)

作者简介: 陶 龙(1986—),男,博士研究生,主要从事大尺寸绝对测距方面的研究。

E-mail: taolong.jerry@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 刘志刚(1970—),男,博士,副教授,主要从事精密测量与装配方面的研究。

E-mail: mezglu@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

针对这一问题, Pollinger 等<sup>[6-7]</sup>提出了直接通过测量光程差位移量来补偿漂移误差的方法。系统中增加一个稳频激光器, 构建一共光路的迈克耳孙干涉仪单独测量光频扫描时光程差的漂移量, 直接补偿光频扫描时的漂移误差。或采用两个扫描方向相反的可调谐激光器共光路测量消除漂移误差的方法。该方法为区分两个激光器的干涉信号, Yang 等<sup>[4]</sup>采用斩波器使两个激光器分时照射干涉仪, 而 Kakuma 等<sup>[8]</sup>采用偏振分光棱镜分离两激光器的干涉信号。两个激光器对应的测量结果的漂移误差放大项大小相等、符号相反, 相加平均后即可达到消除漂移误差的目的。以上两种方法都可有效地消除测量结果的漂移误差, 但都增加了成本和激光器控制系统及光路结构的复杂性。

Swinkels 等<sup>[9]</sup>提出只采用一个可调谐激光器的连续正反向扫描四点相位漂移误差补偿算法, 通过消除位移量的二阶导数, 降低测量对目标运动的敏感程度。但是在测量光频扫描起始点和终止点的相位时需要花费 0.1 s 的时间将光频锁定在法布里-珀罗谐振腔, 使得相位测量不同步。

Cabral 等<sup>[5]</sup>提出了一种只采用一个可调谐激光器的漂移误差补偿方法。该方法假设激光频率扫描时目标镜的漂移速度恒定, 连续进行两次光频扫描, 测量两次扫描条纹数和扫描时间, 通过公式推导修正漂移误差。

在不增加测量系统复杂程度的前提下, 为克服现场测量时目标镜的低频振动或缓慢漂移对 FSI 测量结果的影响, 本文在分析 FSI 测量原理及漂移误差影响的基础上, 提出了一种光频连续正反向扫描的漂移误差补偿方法。该方法采用一个可调谐外腔半导体激光器, 通过三角波信号连续正反向扫描光频, 利用连续两次扫描测量值的漂移误差放大项符号相反的特性补偿漂移误差。

## 2 FSI 测量原理及漂移误差的影响

### 2.1 FSI 测量原理

FSI 测量迈克耳孙干涉仪参考臂和测量臂的光程差, 如图 1 所示。目标镜静止时, 光频线性扫描, 干涉信号 (IS) 相位随光频线性变化, 其光强信号由光电探测器接收:

$$I(t) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[ \frac{2\pi D_{OP}}{c} v(t) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为直流光强幅值,  $\gamma$  为条纹可见度,  $D_{OP}$  为光程差,  $c$  为光在真空中的速度,  $v(t)$  为光频随时间变

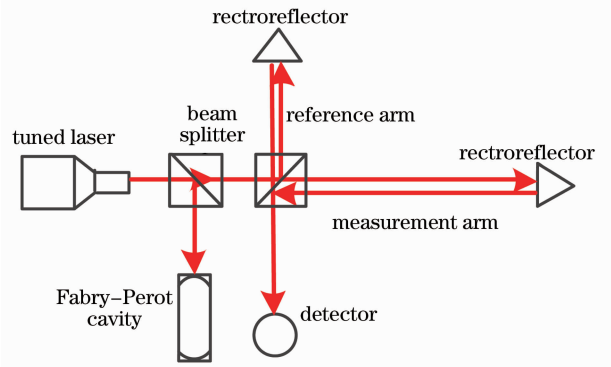


图 1 FSI 绝对测距系统原理图

Fig. 1 Schematic of FSI absolute distance measurement system

化函数。

当光频从  $v_s$  线性扫描到  $v_s + \Delta v$ , 干涉信号相位变化量为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi D_{OP}}{c} \Delta v. \quad (2)$$

所以只需要精确测量干涉信号相位变化量  $\Delta\varphi$  和光频扫描范围  $\Delta v$  就可直接计算出待测距离  $L$ :

$$L = \frac{c\Delta\varphi}{2 \times 2\pi\Delta v} = \frac{\Lambda}{2} N, \quad (3)$$

式中  $\Lambda = c/\Delta v$  为合成波长,  $N$  为条纹数, 包括整数部分和小数部分。由 (3) 式可知, FSI 绝对测距方法不需要移动测量反射镜就可以直接测量出目标的绝对位置, 即使测量过程中断光源, 只需重新扫描测量即可。

### 2.2 目标镜振动漂移对测量结果的影响

实际现场测量条件下, 激光器光频扫描测量过程中, 目标镜不可能处于完全静止的状态。假设当光频线性扫描到  $v_1$  时对应的光程差为  $D_{OP1}$ , 扫描到  $v_2$  时对应的光程差为  $D_{OP2}$ , 则光频从  $v_1$  线性扫描到  $v_2$  对应的干涉相位变化量为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi D_{OP2}}{c} v_2 - \frac{2\pi D_{OP1}}{c} v_1. \quad (4)$$

在扫描过程中光程差变化了  $\Delta\epsilon$ , 光频扫描范围为  $\Delta v_{21}$ , 令

$$D_{OP2} = D_{OP1} + \Delta\epsilon, \quad (5)$$

$$v_2 = v_1 + \Delta v_{21}, \quad (6)$$

将 (5)、(6) 式代入 (4) 式, 整理得

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{c} (D_{OP1} \Delta v_{21} + v_2 \Delta\epsilon). \quad (7)$$

由于实际测量时, 采样测量得到的只是相位变化量  $\Delta\varphi$  和光频变化范围  $\Delta v_{21}$  的绝对值, 调整 (7) 式等式两边, 最终的测量结果可表示为

$$L_{\text{drift}} = \frac{c|\Delta\varphi|}{2 \times 2\pi|\Delta\nu_{21}|} = \frac{1}{2} \left( D_{\text{OP1}} \pm \frac{\nu_2}{|\Delta\nu_{21}|} \Delta\epsilon \right), \quad (8)$$

式中正负号和光频的扫描方向有关,光频正向扫描时符号为正,反向扫描时为负号。

由(8)式可知,在目标镜存在振动漂移的测量过程中,最终的测量结果包含两项,第一项为光频扫描起始时  $\nu_1$  对应的光程差,第二项为光程差的漂移误差放大项。与(5)式相比,(8)式第二项为实际漂移误差  $\Delta\epsilon$  的  $\nu_2/|\Delta\nu_{21}|$  倍。以 Newfocus TBL7021 可调谐半导体激光器为例,其中心频率  $\nu_m$  对应的波长为 1064 nm,连续无跳模可调谐范围约  $\Delta\nu = 100$  GHz,则漂移误差放大因子  $f = \nu_2/|\Delta\nu_{21}| \approx \nu_m/\Delta\nu = 2819.5$ 。在光频扫描测量过程中目标镜即使产生 1 nm 极其微小的漂移,也会被放大到约 2.8  $\mu\text{m}$ ,严重影响了绝对测距精度。可采用可调谐范围大的激光器,增大光频扫描范围以降低漂移误差放大因子  $f$ ,但是大范围的可调谐激光器从技术和成本上较难实现<sup>[10-11]</sup>。因此必须通过其他途径减小或消除漂移误差放大项对测量结果的影响。

对于光频扫描周期时间内有多个振动周期的高频振动,多次测量求平均可降低漂移误差对测量结果的影响<sup>[4]</sup>。但是对于低频振动或缓慢漂移,特别是目标镜的振动频率远低于光频扫描频率时,多次测量求平均并不能有效地削弱漂移误差<sup>[5]</sup>。但是由于连续两次光频扫描周期内的目标镜的振动方向和速度大小近似恒定,所以光程差漂移量近似相等。基于此,根据漂移误差放大项的符号与光频扫描方向有关的特性提出光频连续正反向扫描的漂移误差补偿方法,以减小缓慢漂移误差对测量结果的影响。

### 3 FSI 漂移误差补偿算法

由(8)式可知,FSI 测量系统光频扫描测量时光程差不固定,则误差放大项的符号和扫描方向有关。当目标反射棱镜低频振动,且振动频率远低于光频扫描频率时,可假设在短时间内,目标镜的位移方向和速度大小均不变。依据一正一反的连续两次 FSI 测量结果的漂移误差放大项符号相反的特性,可建立如下误差补偿模型,以减小漂移引起的误差。

如图 2 所示,  $t_0 \sim t_1$  时间区间光频从  $\nu_s$  扫描到  $\nu_e$ ,则光频扫描范围  $\Delta\nu = \nu_s - \nu_e$ ,目标镜位置从  $L_0$  线性变化到  $L_1$ ,正向扫描周期内位移差  $\Delta\epsilon_1 = L_1 - L_0$ 。根据 FSI 测量原理,测量值为

$$D_1 = L_0 + \frac{\nu_m}{\Delta\nu} \Delta\epsilon_1. \quad (9)$$

$t_2 \sim t_3$  时间区间光频反向扫描,则光频变化量为  $-\Delta\nu$ ,该扫描周期内位移差  $\Delta\epsilon_2 = L_3 - L_2$  测量结果为

$$D_2 = L_2 - \frac{\nu_m}{\Delta\nu} \Delta\epsilon_2. \quad (10)$$

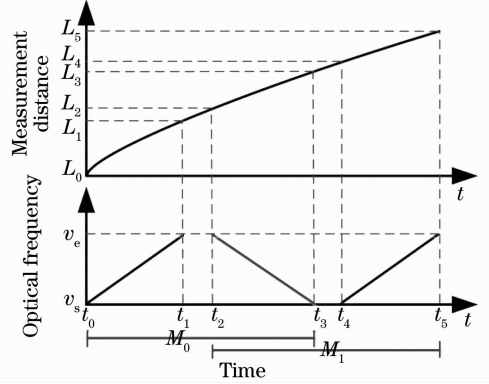


图 2 FSI 光频连续正反向扫描漂移误差补偿示意图

Fig. 2 Diagram of compensation method for drift error by consecutive forward and reverse optical frequency scanning

假设连续两次光频线性扫描周期内的目标镜漂移速度  $s$  不变,则  $t_0 \sim t_1$  和  $t_2 \sim t_3$  时间区间内目标反射棱镜的位移分别为

$$\Delta\epsilon_1 = s\Delta t_{01}, \quad \Delta\epsilon_2 = s\Delta t_{23}, \quad (11)$$

式中  $\Delta t_{01}$  表示光频从  $\nu_s$  扫描到  $\nu_e$  的时间,  $\Delta t_{23}$  表示光频从  $\nu_e$  扫描到  $\nu_s$  的时间。若正反向扫描时间相等,则  $\Delta\epsilon_1 = \Delta\epsilon_2$ ,由(9)~(11)式,可得

$$M_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{L_0 + L_2}{2}, \quad (12)$$

式中  $M_0$  表示  $(t_0 + t_2)/2$  时刻对应的测量反射镜位置,记为一次补偿测量。

实际光频扫描过程中,目标镜的运动速度不可能恒定不变,所以不能完全消除漂移误差放大项,实际测量时(12)式应改写为

$$M_{s_0} = \frac{L_0 + L_2}{2} + \frac{\nu_m}{\Delta\nu} \Delta\theta_1, \quad (13)$$

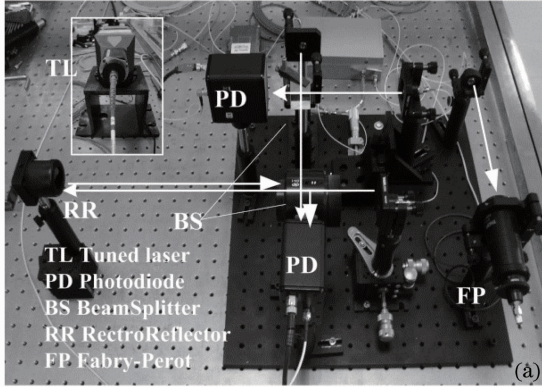
式中  $\Delta\theta_1 = \Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2$  表示连续两次扫描测量的漂移误差的残差。因为相邻两次扫描,光程差的变化速度相近,则  $|\Delta\theta_1|$  小于  $|\Delta\epsilon_1|$  和  $|\Delta\epsilon_2|$ ,  $M_{s_0}$  相比于  $D_1$  和  $D_2$  减小了单向扫描漂移误差放大项的幅度。

### 4 FSI 测量补偿验证系统

FSI 测量系统光源采用 Newfocus TBL7021 可调谐外腔半导体激光器,可调谐范围 93 GHz,中心波长 1064 nm。使用自由光谱范围 1.5 GHz 法布

里-珀罗标准具测量光频扫描范围。在光频扫描干涉相位提取时,法布里-珀罗信号(FPS)扫描范围的起始光强极大值和终止光强极大值点,在时域上将作为截断干涉信号的窗口,用于计算扫描范围内的干涉相位变化量。为简化光路结构和扩大测量范围,部分光路采用光纤<sup>[12]</sup>,如图3(a)所示。

同时为降低相位提取随机误差,采用法布里-珀



罗信号窗口滑动平均方法提取光频扫描相位变化量。如图3(b)所示,在光频扫描范围内,以  $N$  个法布里-珀罗信号光强极大值作为一个窗口,以相邻两个法布里-珀罗信号光强极大值为间隔,向后滑动,直至终止光强极大值点。测量每个滑动窗口对应的相位差,其算数平均值作为一次光频扫描相位差测量值。

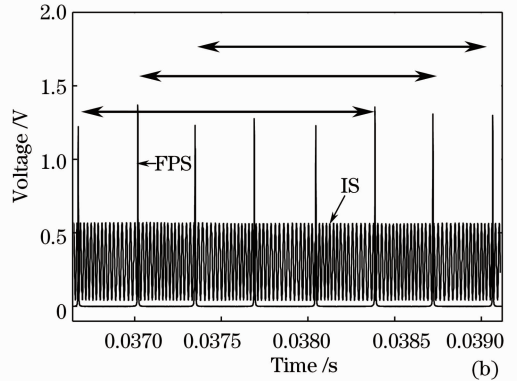


图3 FSI测量系统装置及信号处理方法。(a) FSI面包板;(b) 法布里-珀罗信号和干涉信号局部放大图

Fig. 3 FSI setup and signal processing method. (a) FSI breadboard; (b) typical FSI interferometer and Fabry-Perot signals

考虑到计算机处理能力和系统测量频率,设定信号采样频率为  $2.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ,采样时间  $0.5 \text{ s}$ 。依据FSI振动漂移误差产生原理,光频扫描周期应尽可能短,以减小扫描周期内目标镜的振动漂移。因为测量系统光源为Littman-Metcalf结构的外腔半导体可调谐激光器,通过电压扫描信号线性伸缩PZT,实现光频的机械扫描。所以扫描周期不可能无限减小,且考虑到扫描的非线性,最终采用修正过的三角波信号实现光频连续正反向扫描,扫描信号重复频率为  $20 \text{ Hz}$ ,单向扫描周期约为  $0.025 \text{ s}$ ,保证在单向扫描时有较大范围的光频线性扫描范围<sup>[13]</sup>。

为了验证FSI目标镜漂移误差补偿方法的有效性,将目标镜置于低频振动环境下。使用德国米铱eddyNCDT 3010位移传感器,静态分辨率为  $25 \text{ nm}$ ,检测目标镜沿测量光路方向上的振动信号,同时锁定激光器为一单频激光,观察发现单频激光形成的干涉条纹数与电容传感器检测的振动位移量相吻合,目标镜的振动频率约为  $4.7 \text{ Hz}$ ,振幅约为  $1 \mu\text{m}$ ,即该环境下光程差的漂移由目标镜的振动引起。

定义一次信号采样  $0.5 \text{ s}$  作为一次FSI采样测量,测量周期内的一次单向光频扫描测量称为一次扫描测量。测量时数据采集卡同步采样干涉信号和

法布里-珀罗信号,舍去FSI采样测量周期内不完整的单向光频扫描区间,得到  $n$  次完整单向扫描周期,即一次采样测量进行了  $n$  次扫描测量  $D(i), i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。根据补偿算法,以相邻一正一反两次扫描的测量结果计算平均值,并依此向后滑动平均窗口如图2中  $M_0, M_1$  所示,得到  $n-1$  个平均值:

$$M_s(j) = \frac{D(j) + D(j+1)}{2}, \quad (14)$$

式中  $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$ ,然后计算  $n-1$  个均值的算数平均值作为一次FSI采样测量结果:

$$L_M = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} M_s(j). \quad (15)$$

## 5 实验结果与分析

为说明漂移误差补偿的过程,设置测量距离为  $1543.3 \text{ mm}$  附近。如图4(a)所示,每一个空心圆点代表一次单向扫描测量结果。因正反向交替扫描导致漂移误差放大项符号相反,其测量值随扫描次序呈锯齿状分布。实心圆点为补偿后的结果,每一点为左右两次单向扫描结果的均值。可以很明显地观察到,以该方法补偿后的结果较大地减小了由漂移误差引起的幅度变化。

图4(b)为连续40次FSI采样测量的结果。实心圆点代表采用补偿方法的连续40次FSI采样测



量结果,而每个空心圆点为对应一次采样测量周期内的所有单向测量值的平均值。从图中可以明显看出,补偿后测量结果明显集中于平均值,40次连续

FSI 采样测量的标准差为  $8\ \mu\text{m}$ ,而简单的多次测量求平均的标准差为  $51.9\ \mu\text{m}$ 。

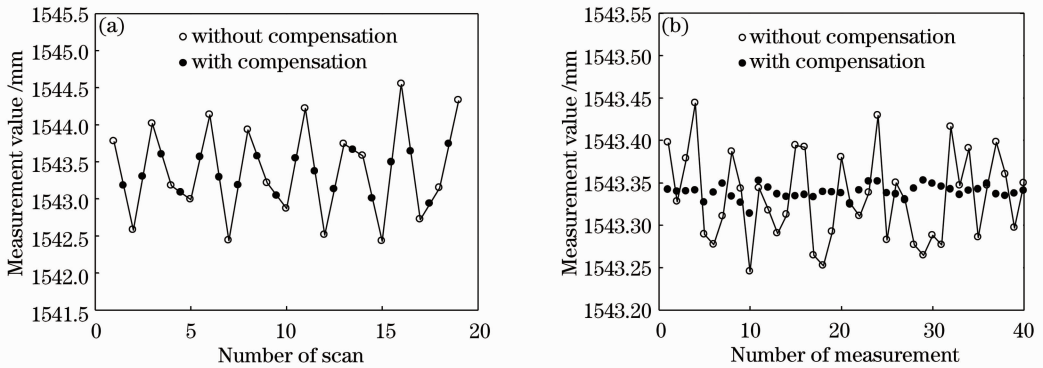


图 4 补偿前后测量结果。(a) 漂移误差补偿过程; (b) 连续 40 次采样测量

Fig. 4 Measured results before and after compensations. (a) Drift error compensation process; (b) 40 consecutive measurements

## 6 结 论

分析研究了 FSI 测量原理及目标镜存在振动漂移时漂移误差对测量结果的影响。在不增加系统复杂程度的前提下,针对低频缓慢振动,根据漂移误差放大项符号与光频扫描方向有关的特性,提出一种光频连续正反向扫描的漂移误差补偿方法。当单向光频扫描周期远低于振动周期时,假设短时间内光程差的漂移速度恒定,通过计算一正一反连续两次光频扫描测量结果的算术平均值,以减小测量结果的误差幅度。通过实验验证该方法的可行性,实验结果表明测量距离  $1543.3\ \text{mm}$  处,目标镜振动频率为  $4.7\ \text{Hz}$ ,振幅为  $1\ \mu\text{m}$ ,采用该补偿方法后,连续 40 次 FSI 采样测量结果的标准差由补偿前的  $51.9\ \mu\text{m}$  下降到  $8\ \mu\text{m}$ 。因频率扫描干涉仪光频扫描需要一定时间,所以该补偿方法的应用有一定局限性,仅适用于振幅小且振动频率低的静态测量,并不适用于跟踪目标镜快速运动的动态测量。

## 参 考 文 献

- J Thiel, T Pfeifer, M Hartmann. Interferometric measurement of absolute distances of up to 40 m [J]. *Measurement*, 1995, 16(1): 1-6.
- A F Fox-Murphy, D F Howell, R B Nickerson, *et al.*. Frequency scanned interferometry (FSI): the basis of a survey system for ATLAS using fast automated remote interferometry [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 1996, 383(1): 229-237.
- P A Coe, D F Howell, R B Nickerson. Frequency scanning interferometry in ATLAS: remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment [J]. *Meas Sci & Technol*, 2004, 15(11): 2175-2187.
- H J Yang, S Nyberg, K Riles. High-precision absolute distance measurement using dual-laser frequency scanned interferometry under realistic conditions [J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res*

- Sect A, 2007, 575(3): 395-401.
- A Cabral, J M Rebordão, M Abreu. Dimensional Metrology and Frequency Sweeping Interferometry [M]. Rijeka: InTech, 2012. 51-76.
- F Pollinger, K Meiners-Hagen, M Wedde, *et al.*. Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(32): 6188-6194.
- Li Zhidong, Jiang Yuesong, Sang Feng, *et al.*. Movement error compensation in frequency scanning interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0314001.
- 李志栋, 江月松, 桑峰, 等. 频率扫描干涉法绝对测距中运动误差的补偿研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0314001.
- S Kakuma, Y Katase. Frequency scanning interferometry immune to length drift using a pair of vertical-cavity surface-emitting laser diodes [J]. *Opt Rev*, 2012, 19(6): 376-380.
- B L Swinkels, N Bhattacharya, J J M Braat. Correcting movement errors in frequency-sweeping interferometry [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(17): 2242-2244.
- Li Zhiyong, Tan Rongqing, Huang Wei, *et al.*. Laser diode with long external cavity of volume Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1102006.
- 李志永, 谭荣清, 黄伟, 等. 长腔长体布拉格光栅外腔半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1102006.
- Mei Jiawei, Xiao Xiaosheng, Xu Mingrui, *et al.*. Wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114003.
- 梅佳伟, 肖晓晟, 许明睿, 等. 基于色散调谐宽带扫频光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114003.
- Lü Tao, Liu Zhigang, Deng Zhongwen, *et al.*. A range amplified absolute distance measurement system with laser frequency sweeping interferometry by optical fiber pairs [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 77-82.
- 吕涛, 刘志刚, 邓忠文, 等. 一种光纤组量程扩频的激光频率扫描干涉绝对测距系统 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(9): 77-82.
- Deng Zhongwen, Liu Zhigang, Tao Long, *et al.*. Novel frequency scanned interferometry absolute distance measurement by tunable external-cavity diode laser [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(5): 104-109.
- 邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 等. 新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距的方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(5): 104-109.