

光电振荡器测距方法中的纵模阶数测量

郝继贵¹ 郭庭航¹ 林嘉睿^{1*} 张涛² 崔鹏飞¹

(¹ 天津大学精密测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)
² 天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

摘要 在光电振荡器(OEO)测距方法中,振荡频率与环路群时延关系的建立依赖于纵模阶数,纵模阶数测量误差直接影响测距精度。但是 OEO 频率稳定性较低,通过直接测量振荡频率和相邻纵模频率间隔所获得的纵模阶数误差较大。分析了频率漂移对纵模阶数测量的影响及测量过程中的频率漂移规律,提出一种新的纵模阶数测量方法,该方法在不改变 OEO 结构的基础上,利用 OEO 纵模等间隔分布的特点,分别测量振荡模到 x 阶高阶模和 x 阶低阶模的频率间隔后获取纵模间距,减小并补偿频率漂移造成的误差。随后建立了纵模阶数测量误差模型,并进行了 1 km 光纤 20 GHz 信号的纵模阶数测量对比实验,实验结果与误差模型相符。

关键词 测量;纵模阶数;光电振荡器;误差补偿

中图分类号 TH711 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0308004

Mode Number Determination of Distance Measurement Method Based on Optoelectronic Oscillators

Zhu Jigui¹ Guo Tinghang¹ Lin Jiarui¹ Zhang Tao² Cui Pengfei¹

(¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Tianjin Institute of Metrological Supervision Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract The mode number of optoelectronic oscillators is the key parameter to establish the relationship between the oscillation frequency and loop group delay in the distance measurement method based on optoelectronic oscillators (OEO), and the mode number error can affect the accuracy directly. Due to the low frequency stability of OEO, the accuracy of mode number by measuring the oscillation frequency and inter-mode frequency spacing is not high. The influence of frequency stability on the mode number error and the change law of frequency drifts are analyzed. Then a new method to determine the mode number without changing the structure of OEO is proposed. In this method, the frequency spacing between oscillation mode and x -order-higher mode and the frequency spacing between oscillation mode and x -order-lower mode are measured separately to get the inter-mode frequency spacing, in order to compensate and reduce error induced by frequency drifts. The mode number measurement error model of this method is established. Experiments are conducted by using different methods, and the experimental results are consistent with error analysis.

Key words measurement; mode number; opto-electronic oscillators; error compensation

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.4820; 060.2320

1 引言

大尺度长度测量是大型装备制造及精密工程安装的基础支撑技术之一。当前快速发展的重大基础

装备制造对大尺度长度测量在精度、测量范围、测量效率和灵活性等方面提出了新的挑战^[1-3]。传统的大尺度测量方法存在诸多不足,短期内难有突破性

收稿日期: 2013-10-08; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041205)、国家杰出青年科学基金(51225505)

作者简介: 郝继贵(1970—),男,博士,教授,主要从事光电测试技术及视觉检测等方面研究。

E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: linjr@tju.edu.cn

进展,需要发展新的测量方法。基于光电振荡器(OEO)的测距方法是一种新提出的方法^[4-7],该方法将包含待测距离的空间光路耦合入其光学谐振腔,将距离测量转变为微波频率的测量。基于OEO光学谐振腔超长(可达数千千米)、振荡频率高(可达几十吉赫兹)、振荡频率对环路群时延敏感等特点,该方法具有实现大尺度高精度绝对距离测量的潜力。

纵模阶数是建立环路群时延与振荡频率之间关系的参数,其精度直接影响OEO测距方法的精度。纵模阶数可简单地通过测量振荡频率 f_{osc} 和相邻两纵模的频率间隔 f_b 获得。由于纵模阶数很大(对于20 GHz的信号,数量级为 10^5),振荡频率和纵模间距都需要达到很高的相对测量精度。同时纵模阶数对纵模间距的误差非常敏感,对应1 km光纤20 GHz振荡信号,纵模阶数的测量误差对纵模间距测量误差的斜率约为 0.5 Hz^{-1} 。由于OEO的环路群时延对诸如温度、振动和应力等环境因素非常敏感,频率稳定性较差,使得纵模间距 f_b 的测量存在较大误差,严重影响纵模阶数的测量精度。

目前国内外尚无对纵模阶数测量的系统研究。文献[5]中用频谱仪直接测量振荡频率及纵模间距,没有对频率漂移采取补偿措施。在不考虑频率漂移的情况下,仅由频谱仪扫宽(SPAN)精度(Agilent E4446A 频谱仪)造成的纵模阶数相对测量误差可达2.5%,无法满足高精度距离测量对纵模阶数精度的需求。

本文分析了频率漂移对纵模阶数测量的影响以及测量过程中频率漂移的规律,并在频率漂移造成误差的规律及OEO的频谱特性基础之上,提出一种新的纵模阶数的测量方法,建立误差模型。最后进行了1 km光纤20 GHz信号的纵模阶数测量对比实验,验证所提方法及模型的可行性。

2 基于OEO的测距方法的原理及纵模阶数测量

2.1 基于OEO的测量方法的原理

标准结构OEO由连续光激光器、电光调制器、长光纤、光电探测器、滤波器、放大器构成反馈环路,利用光纤高延时、高带宽、低损耗的特点,获得低相位噪声、高Q值微波信号^[8-12]。OEO测距方法在OEO基本结构上,将待测长度的空间光路耦合入其光学谐振腔,如图1所示,通过测量振荡频率,利用振荡频率、环路群时延的对应关系得到被测距离。

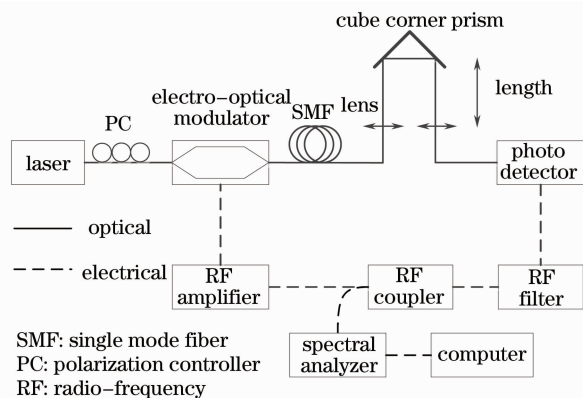


图1 基于OEO的距离测量原理图

Fig.1 Distance measurement method based on OEO

OEO谐振腔模可表示为 $\omega_k = 2\pi \cdot \frac{N_k}{\tau}$,其中 ω_k 为第 k 阶纵模的角频率, N_k 为纵模阶数,它是一个正整数, τ 为环路群时延。OEO的纵模为等间隔分布^[13],其模间距 $f_b = \frac{1}{\tau}$ 。由于增益竞争,在滤波器通带内存在的多个可以起振的纵模中只有一个纵模能起振并维持稳定振荡,其他纵模将以边模的形式继续存在于振荡信号的频谱^[8]。起振纵模的阶数 N 取决于OEO接通时振荡环路内的噪声分布^[14],振荡频率 f_{osc} 可以表示为^[4-5]

$$f_{osc} = \frac{N}{\tau} = N \cdot f_b. \quad (1)$$

纵模阶数 N 建立了振荡频率与环路群时延的一一对应关系,其测量误差 ΔN 与其造成的距离测量误差 ΔL 的关系可以表示为 $\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta N}{N}$,因此纵模阶数的相对误差 $\frac{\Delta N}{N}$ 将直接传递到测距相对误差之中。

2.2 频率漂移对纵模阶数测量的影响

纵模阶数可直接利用振荡频率 f_{osc} 与纵模间距 f_b 之间的整倍数关系得到

$$N_k = \left[\frac{f_{osc}}{f_b} \right], \quad (2)$$

式中 $[\]$ 表示对结果进行四舍五入取整。纵模阶数的误差 ΔN_k 取决于振荡频率 f_{osc} 及纵模间距 f_b 的测量误差,可以表示为

$$\Delta N = \left[\frac{1}{f_b} \cdot \Delta f_{osc} - \frac{f_{osc}}{f_b^2} \cdot \Delta f_b \right]. \quad (3)$$

测量过程中的频率变化是误差的主要来源。由测量各频率点并非同步进行,导致振荡频率及模间距测量存在误差 Δf_{of} 、 Δf_{bf} 。从(3)式可以看出纵模

阶数对振荡频率误差不敏感,但是对纵模间距的误差非常敏感,因此减小纵模阶数误差的关键在于减小频率漂移造成的纵模间距测量误差。

3 纵模阶数测量新方法

3.1 频率漂移的特点分析

OEO 起振后,振荡频率主要受环境温度变化的影响^[15],振动和应力等环境因素的影响相对于温度变化可以忽略不计。研究表明振荡信号的频率变化 Δf_{osc} 与温度变化 ΔT 近似呈线性关系^[15-17],即 OEO 频率变化可以近似表达为 $\Delta f \approx K \cdot f_{\text{osc}} \cdot \Delta T$,式中 $K \approx -8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。因此 OEO 的振荡频率变化趋势与温度变化的趋势相关。图 2 为在白天和晚上长时间观测的振荡频率与温度值。可以看出,气温在白天里连续地升高,而振荡频率随着温度的升高连续下降,而在晚上,温度与振荡频率的变化趋势与白天相反。因此一般情况下,在一段时间内振荡频率的漂移方向是固定的,且短时间内漂移速率变化不大。

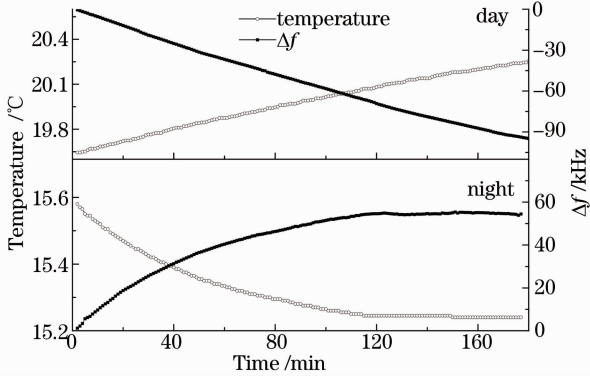


图 2 OEO 的频率与温度的变化

Fig. 2 Variations of oscillation frequency drifts and temperature

在一定时间内频率一直朝同一方向漂移,因此在此期间测得的低阶纵模到高阶纵模频率间隔误差的符号相同,与测得的高阶纵模到低阶模的频率间隔误差的符号相反。利用这个特点可使两者的误差互相补偿。

3.2 纵模阶数测量新方法及误差分析

为了提高频率测量精度,采用频谱仪的计数器模式进行频率测量,克服扫宽 (SPAN) 及分辨率带宽 (RBW) 对频率测量精度的影响。测量过程中,以较快的速度测量主振荡模到主振荡模第 x 级高阶边模频率差 $(f_{k+x} - f_k)$ 及主振荡模的振荡频率 f_k ,接着以较快的速度测量主振荡模到主振荡模第 x 级低阶边模频率差 $(f_k - f_{k-x})$ 。利用 OEO 纵模等间隔分

布的特点,其纵模间距可以表示为 $f_b = \frac{(f_{k+x} - f_k) + (f_k - f_{k-x})}{2x}$,利用 (2) 式可得纵模阶数 N_k 的表达式为

$$N_k = \left[\frac{2x \cdot f_k}{(f_{k+x} - f_k) + (f_k - f_{k-x})} \right]. \quad (4)$$

f_k 和 f_b 的测量误差主要来源于频谱仪的频率测量误差及 OEO 频率漂移造成的测量误差。频谱仪计数器模式的绝对频率 (屏幕内指定信号的频率) 误差和相对频率 (屏幕内频谱成分之间的频率差) 误差可以分别表示为 $\Delta f_a = \pm (a \cdot f_a + b)$ 和 $\Delta f_r = \pm (a \cdot f_r + d)$,式中 f_a 为频谱仪光标读出频率, f_r 是相对频率, a 为频谱仪的频率基准精度, b 和 d 都是由频谱仪分辨力造成的误差。对于 Agilent N9020A 型频谱仪, $a \approx 1.55 \times 10^{-7}$, $b = 0.1 \text{ Hz}$, $d = 0.141 \text{ Hz}$ 。于是由频谱仪造成的振荡频率测量误差 Δf_{os} 及模间距测量误差 Δf_{bs} 可以分别表示为

$$\Delta f_{\text{os}} = \pm (a f_{\text{osc}} + b), \quad (5)$$

$$\Delta f_{\text{bs}} = \frac{\Delta (f_{k+x} - f_k) + \Delta (f_k - f_{k-x})}{2x} \approx \pm \left(a f_b + \frac{d}{x} \right). \quad (6)$$

对于频率漂移造成的误差,如图 3 所示,假设在测量 $k+x$ 阶纵模与 k 阶模频率差的过程中,主振荡模的频率 f_k 增大了 Δf_k ,当光标放置到第 $k+x$ 阶纵模时,主振荡频率从 $(f_k + \Delta f_k)$ 继续向右漂移了 Δf_t ,而在测量第 $k-x$ 阶纵模到 k 阶模频率间隔的期间,主振荡频率继续往右漂移了 $\Delta f'_k$ 。

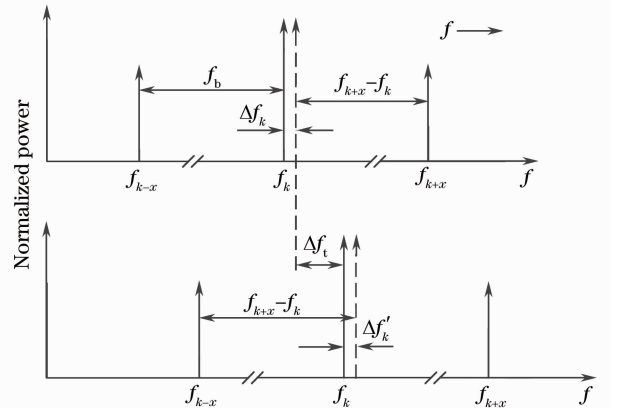


图 3 频率漂移对模间距测量的影响

Fig. 3 Influence of frequency drifts on the measurement of mode spacing

两次所测 x 级纵模间距可以分别表示为

$$f_{k+x} - f_k = \pm (x f_b - \Delta f_k), \quad (7)$$

$$f_k - f_{k-x} = \Delta f'_k + \frac{x \cdot (f_k + \Delta f_k + \Delta f_t)}{N_k}. \quad (8)$$

主振荡频率的测量误差 $\Delta f_{of} = \Delta f_k$ 。由频率漂移造成的纵模间隔测量误差可以表示为

$$\Delta f_{bf} = \frac{\Delta f_k - \Delta f'_k}{2x} + \frac{\Delta f_k + \Delta f_t}{2N_k} \quad (9)$$

根据(3)、(4)式,纵模阶数测量总误差可表示为

$$\Delta N = \left[\frac{1}{f_b} \cdot (\Delta f_{os} + \Delta f_{of}) - \frac{f_k}{f_b^2} \cdot (\Delta f_{is} + \Delta f_{bf}) \right] = \left[\frac{\pm (af_k + b) + \Delta f_k}{f_b} - \frac{f_k}{f_b^2} \left[\pm (af_b + \frac{d}{x}) + \frac{\Delta f_k - \Delta f'_k}{2x} + \frac{\Delta f_k + \Delta f_t}{2N_k} \right] \right] \quad (10)$$

由于 $\frac{\pm (af_k + b) + \Delta f_k}{f_b} \ll 1, \frac{f_k}{f_b^2} \cdot af_b \ll 1, \frac{f_k}{f_b^2} \cdot \frac{\Delta f_t}{2N_k} = \frac{\Delta f_t}{2f_b} \ll 1$, 所以由振荡频率 f_{osc} 的误差、频率基准精度造成的相对频率测量误差以及两次测量间隔内振荡频率的漂移 Δf_t 造成的误差均可忽略不计。于是该方法的测量误差可以简化为

$$\Delta N_k \approx \left[\frac{f_k}{f_b^2} \left(\mp \frac{d}{x} + \frac{\Delta f'_k - \Delta f_k}{2x} \right) \right] \quad (11)$$

纵模阶数测量误差来源于频谱仪分辨力造成的误差 d 及两次测量过程中的频率漂移之差 $(\Delta f_k - \Delta f'_k)$ 。由于 $(f_{k+x} - f_k)$ 与 $(f_k - f_{k-x})$ 的测量时间较短,且两次测量的时间间隔很短,因此 Δf_k 与 $\Delta f'_k$ 大小相近,于是 $\frac{\Delta f_k - \Delta f'_k}{2x} < \Delta f_k - \Delta f'_k \ll \Delta f_k \approx \Delta f'_k$ 。该方法对误差的减小作用体现在两个方面:1) 利用 OEO 纵模等间隔分布的特点,利用平均效应将频率漂移造成的误差和仪器测量误差减小到原来的 $\frac{1}{x}$;2) 利用频率漂移的规律补偿频率漂移造成的误差。

4 实验及数据分析

OEO 测距方法为了使 OEO 信号的谱纯度足够高,同时减小光纤时延变化造成的误差,光纤的长度一般选择在 1 km 左右^[11]。因此实验选择 1 km 的光纤,振荡频率选定 20 GHz 左右,用不同方法测量纵模阶数。根据(11)式测量误差可表示为 $\Delta N_k \approx \left[\mp \frac{0.0705}{x} + \frac{\Delta f'_k - \Delta f_k}{4x} \right]$, 频谱仪测量误差可以忽略不计。

图 4 为通过测量振荡模到低阶模的频率间隔获得不经补偿的模间距得到的纵模阶数。方形点对应用频谱仪直接测量的数据,由于分辨力较低,所得 N 值在两个数值跳动,精度很低。 $x = 1$ 的点也可视为传统方法在计数器模式下的结果。对比 $x = 10$ 的数据点, $x = 1$ 的离散度更大,且处于 $x = 10$ 的数据点下方。

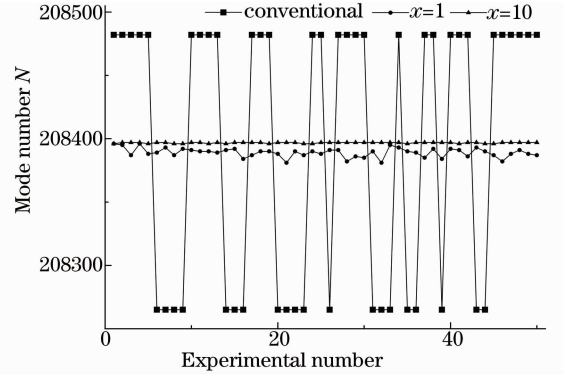


图 4 不同方法纵模阶数的测量结果
Fig. 4 Results of the mode number under different methods

图 5 为采用新方法取 $x = 1$ 和 $x = 2$ 的测量结果。其中 N_L 对应通过测量振荡模到低次模的频率间隔获得纵模阶数, N_R 对应通过测量振荡模到高次模的频率间隔获得纵模阶数, N_A 对应将通过两种方法测得的频率间隔取平均获得纵模阶数。可以看出, $N_R > N_A > N_L$, 这说明频率一直在往正方向漂移。 N_A 处于 N_R 与 N_L 之间,其误差小于 N_R 和 N_L 的测量误差。

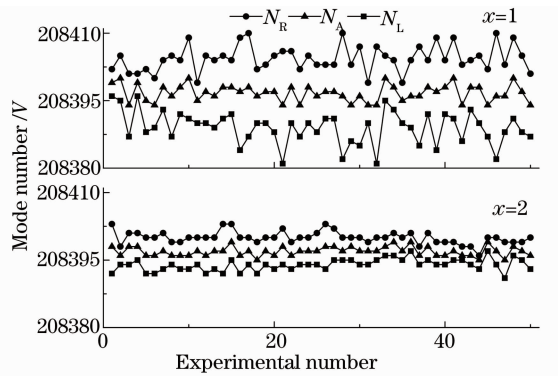


图 5 当 $x = 1$ 和 $x = 2$ 时, N 的测量结果
Fig. 5 Results of the mode number with $x = 1, x = 2$

图 6 为 $x = 1, 2, 5, 10$ 时的统计结果。随着 x 的增大, N_R 逐渐减小, N_L 逐渐增大,二者逐渐趋近。说明 x 的增大可以减小频率漂移对 N 的影响。当

$x = 10$ 时, $N_R = N_L$, 仅通过 x 的平均作用, 即可消除频率漂移造成的纵模阶数的测量误差。 N_R 和 N_L 收敛于 208397, 而对应不同的 x , N_A 始终都等于 208397, 这说明 N_A 对频率漂移的补偿效果很显著, 可以加快纵模阶数的收敛。

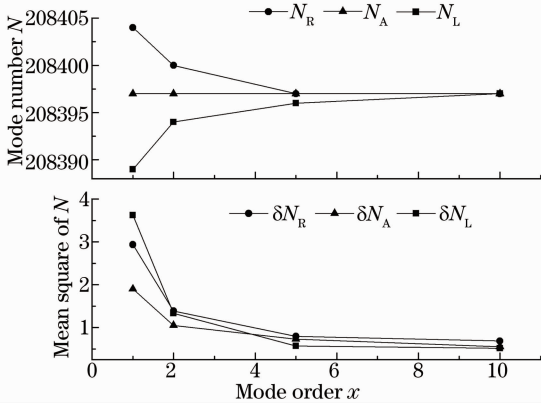


图 6 当 $x=1, 2, 5, 10$ 时, N 的统计结果

Fig. 6 Statistical results of the mode number with $x=1, 2, 5, 10$

理论上测量时取得 x 值越大测量误差越小, 但是随着 x 的增大, 频谱仪显示的各纵模会互相重叠, 且对于频率计数模式, 振荡信号的功率值要超过底噪 40 dB, 因此 x 不可过大。测量时应根据模间距、相噪等因素, 合理增大 x 值。图 6 中对应 $x = 10$ 时 $N_R = N_A$, 说明仅依靠 $x = 10$ 的平均作用即已消除了频率漂移的影响, 因此 $N_R = N_A$ 可以作为判断测量结果正确的充分条件。该方法的补偿效果还取决于两次纵模间距测量过程中的频率漂移之差 ($\Delta f_k - \Delta f'_k$), 因此尽量缩短纵模间隔测量时间, 并保证测量时间相等。

5 结 论

分析纵模阶数测量的误差, 发现纵模间距测量是关键, 而频率漂移是主要的误差源。通过分析频率漂移规律及其造成的频率间隔误差特点基础上, 提出一种新的 OEO 纵模阶数的测量方法, 在不改变 OEO 结构的, 分别测量振荡模到第 x 阶高阶模和第 x 阶低阶模的频率间隔后获得纵模间距, 利用频率漂移的规律使两者的误差互相补偿, 并利用 OEO 纵模等间隔分布的特点, 进一步减小纵模阶数测量误差。建立了该方法的误差模型并进行了验证实验, 实验结果与误差模型相符。

参 考 文 献

1 J P Wallerand, A Abou-Zeid, T Badr, *et al.*. Towards new

absolute long-distance measurement in air[C]. Proc NCSL Int Workshop Symp, 2008.

2 Zhu Jigui, Guo Lei, Lin Jiarui, *et al.*. Non-intrusive precise measuring method of large complex surface[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3524–3529.

郝继贵, 郭磊, 林嘉睿, 等. 大型空间复杂曲面无干扰精密测量方法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3524–3529.

3 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1872–1876.

郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1872–1876.

4 Nguyen Lam Duy, Journet B, Ledoux-rak I, *et al.*. Opto-electronic oscillator: applications to sensors[C]. International Topics' Meeting on 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, 2008. 131–134.

5 L D Nguyen, K Nakatani, B Journet. Refractive index measurement by using an optoelectronic oscillator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(12): 857–859.

6 Wang Jing, Yang Xueyou, Zhang Tao, *et al.*. A distance method based on the optoelectronic oscillator[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(11): 1494–1497.

王婧, 杨学友, 张涛, 等. 基于光电振荡器原理的测距方法研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(11): 1494–1497.

7 A V Loparev, M E Belkin. Modeling a transducer based on an optoelectronic oscillator for precision measurements of the optico-physical parameters of different media [J]. Measurement Techniques, 2011, 53(11): 1236–1245.

8 Y S Yao, L Maleki. Optoelectronic microwave oscillator[J]. J Opt Soc Am B, 1996, 13(8): 1725–1735.

9 Jiang Yang, Yu Jinlong, Wang Yaotian, *et al.*. A novel scheme of dual-loop optoelectronic oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 919–922.

江阳, 于晋龙, 王耀天, 等. 一种新型双环路光电振荡器[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 919–922.

10 Sun Bin, Wang Jinlong, Wang Ju, *et al.*. K-band and high stability optoelectronic oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305010.

孙斌, 于晋龙, 王菊, 等. K波段高稳光电振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305010.

11 Zhang Tao, Zhu Jigui, Guo Tinghang, *et al.*. Effect of fiber length on distance measurement based on optoelectronic oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908003.

张涛, 郝继贵, 郭庭航, 等. 光纤长度对基于光电振荡器距离测量的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908003.

12 Chen Jixin, Chen Shaoyong, Shi Yong, *et al.*. Research on optoelectronic oscillator with switchable frequency and high performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706016.

陈吉欣, 陈少勇, 师勇, 等. 频率可调光电振荡器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706016.

13 Ibrahim Ozdur, Dimitrios Mandridis, Nazanin Hoghooghi, *et al.*. Low noise optically tunable opto-electronic oscillator with Fabry-Perot etalon[J]. J Lightwave Technol, 2010, 21(28): 3100–3106.

14 Etgar C Levy, Moshe Horowitz, Curtis R Menyuk. Modeling optoelectronic oscillator[J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(1): 148–159.

15 M Kaba, H W Li, A S Daryoush. Improving thermal stability of opto-electronic oscillators[J]. Microwave Magazine, 2006, 7(4): 38–47.

16 D Eliyahu, K Sariri, J Taylor, *et al.*. Opto-electronic oscillator with improved phase noise and frequency stability[C]. SPIE, 2003, 4998: 139–147.

17 D Eliyahu, K Sariri, M Kamran, *et al.*. Improving short and long term frequency stability of the opto-electronic oscillators[C]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002. 580–583.

栏目编辑: 何卓铭