

扫频干涉测距光频率非线性阶次跟踪抑制方法

刘 哲 刘志刚 邓忠文 陶 龙

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 针对激光频率扫描干涉(FSI)测距系统中激光器输出光频率非线性对测量精度的影响,提出了一种基于非平稳信号阶次跟踪的方法。从频域的角度分析了FSI测距系统中影响测量精度的主要因素。通过检测法布里-珀罗标准具的透射信号,实现对光频率的快速间接测量。利用最小二乘的方法对光频率进行线性拟合,实现对光频率变化率的修正。通过多项式拟合的方法确定光频率的时间-频率数学表达式,构造等频率的间隔点对其逆向插值,获得对应的时间序列。对采样的干涉信号在时间序列处正向插值,重构等频率间隔采样的干涉信号,对重构的干涉信号进行频谱分析,最终得到非平稳干涉信号的干涉频率。结果表明,在不限制待测距离的条件下,利用阶次跟踪的方法,可以有效抑制激光器输出光频率非线性的影响,FSI测距系统的测量精度得到显著提高。在1000 mm的测量范围内,测量结果的空间分辨率提高了36倍以上。

关键词 测量; 空间分辨率; 非线性光频率; 阶次跟踪; 法布里-珀罗标准具

中图分类号 TB921 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0112003

Suppression of Nonlinear Frequency Sweep in Frequency Sweeping Interferometer Based on Order Tracking Technique

Liu Zhe Liu Zhigang Deng Zhongwen Tao Long

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

Abstract A new method based on order tracking technique for reducing the effect of nonlinear optical frequency swept in frequency sweeping interferometer(FSI) is presented. The main factors affecting the measuring accuracy of the FSI system are discussed in frequency domain. This method utilizes the optical resonant characteristic of a Fabry-Perot etalon to measure the instantaneous optical frequency of a laser rapidly. Carries on the data linear fitting to the optical frequency on the least-square method and make the slope of the linear equation as the correction rate of optical frequency. The time series of equidistant optical frequency grid can be obtained with polynomial fit and interpolation of optical frequency. The interference signal can be resampled according to time series of equidistant optical frequency grid, and then reconstructed by using data interpolation. The frequency value of non-stationary interference signal is achieved after spectral analysis of reconstructed interference signal. The results indicate that this method dramatically reduces the effects of the nonlinear sweep without limit the range of the measured distance, and demonstrates spatial resolution enhancement of more than 36 times in the range of 1000 mm.

Key words measurement; spatial resolution; nonlinear optical frequency sweeping; order tracking; Fabry-Perot etalon

OCIS codes 120.2230; 120.3180; 140.3600

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51375376)

作者简介: 刘 哲(1991—),男,硕士研究生,主要从事大尺寸绝对距离测量方面的研究。E-mail: lzaipay@gmail.com

导师简介: 刘志刚(1970—),男,博士,教授,主要从事大尺寸测量及光电检测技术方面的研究。

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

1 引 言

可调谐半导体激光器的频率扫描干涉(FSI)测距技术是一种重要的绝对距离测量方法^[1-2]。FSI测量系统要求激光器的输出光频率与时间成线性关系^[3],然而激光器在调谐过程中,由于其内部的压电陶瓷(PZT)的迟滞特性^[4-9],导致输出光频率不再呈线性规律变化,影响了系统的测量精度。

针对这一问题,国内外提出了许多抑制激光器输出光频率非线性对测量精度影响的方法。邓忠文等^[10]通过建立激光器输出光频率的传递函数模型,引入补偿量来控制光频率线性输出;由于不同条件下激光器输出光频率的传递函数不同,该模型只能适用于特定条件下的激光器。Soller等^[11]利用辅助干涉光路产生等频率间隔的脉冲序列,控制测量干涉光路直接进行频率采样,缩小了干涉信号频谱的半高宽,克服了光频率调谐的非线性影响,提高了测量结果的空间分辨率;为了满足采样定理的条件,辅助干涉光路的长度必须控制在与实际干涉光路相适应的范围内,限制了实际距离的测量范围。Ahn等^[12-13]通过对干涉信号进行希尔伯特变换,并对变换后的结果进行数学处理,来获得较高空间分辨率的测量结果;该方法要求干涉信号具有较好的简谐特性,这与激光器光频率输出的非线性产生矛盾。

本文提出了一种基于法布里-珀罗(F-P)标准具的光频率测量方法。通过直接测量激光频率扫描过程中透射过F-P标准具产生的透射信号,以此拟合出光频率输出曲线。在此基础上,对非平稳的干涉信号作一阶的阶次跟踪分析,便可以显著提高测量结果的精度。这种方法克服了利用辅助干涉光路对测量距离的限制,能够有效抑制不同驱动条件下激光器输出光频率非线性对FSI测量精度的影响。

2 FSI光频扫描非线性特性分析

2.1 FSI测量原理

FSI测距系统主要由迈克耳孙干涉仪和F-P标准具组成,其测距原理如图1所示。由外腔可调谐外腔半导体激光器(ECDL)产生的频率调谐光束通过分光镜分成两束,一束光进入F-P标准具,用于检测激光的频率变化;另一束光进入迈克耳孙干涉光路,用于检测测量光路与参考光路的光程差。

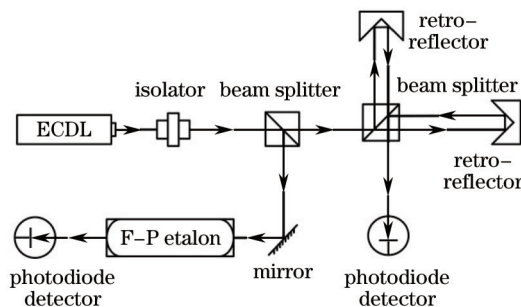


图1 FSI测距系统原理图

Fig.1 Schematic of FSI distance measurement system

当角锥棱镜固定,测量光路与参考光路保持不变时,激光器输出光频率线性调谐,干涉信号的光强表达式为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[\phi(t) - \phi(t - \tau)], \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 分别为参考光路与测量光路的光强, $\phi(t)$ 、 $\phi(t - \tau)$ 分别对应 I_1 、 I_2 的相位, τ 为测量光相对于参考光在时域上的延迟。

代入相位与光频率的关系式后,干涉信号的光强表达式可简化为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos[2\pi\beta(t)\tau t + 2\pi f_0 \tau], \quad (2)$$

式中 $\beta(t)$ 表示激光器输出光频的变化率, f_0 表示输出光信号的中心频率。

在同一测量系统中参考光路与测量光路的光强 I_1 、 I_2 为定值,对干涉信号进行频谱分析可以得到相干光信号的干涉频率 $f(t)$ 为

$$f(t) = \beta(t) \cdot \tau. \quad (3)$$

当激光器输出光频率呈线性规律变化时,即光频率的变化率 $\beta(t)=\beta$ 为一定值,由(3)式可知,干涉频率 $f(t)$ 也将为定值 f 。设测量光相较于参考光的延时为 τ ,故待测光程差 L 的表达式为

$$L = \frac{c\tau}{2n} = \frac{cf(t)}{2n_g\beta(t)} = \frac{cf}{2n_g\beta}, \quad (4)$$

式中 n_g 表示空气折射率。

由(4)式可知,FSI测距系统中决定待测距离 L 测量精度的关键因素是激光频率变化率 β 和干涉信号频率 f ,其中光频率变化率 β 可以通过透射过F-P标准具的透射信号进行检测。图2表示透射过F-P标准具产生的透射信号,由F-P多光束干涉理论可知,当光频率连续变化的光束进入F-P标准具,且光频率满足腔体谐振条件时,光强将会出现极大值,故在此情况下,F-P标准具的透射光强在时域上将呈现出一系列的谐振峰值,两相邻的透射峰值之间的光频率间隔为F-P标准具的自由光谱范围(FSR),用 $\Delta\nu$ 表示。激光频率变化率可表示为

$$\beta = \frac{\Delta\nu}{\Delta t}, \quad (5)$$

式中 Δt 为相邻透射峰值对应的时间间隔。

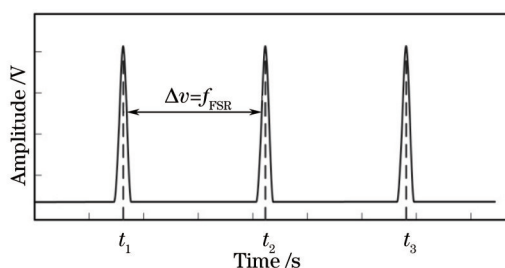


图2 F-P透射信号示意图

Fig.2 Diagram of F-P transmission signal

2.2 光频率输出非线性对测量精度的影响

可调谐外腔半导体激光器是通过控制内部的压电陶瓷(PZT)来驱动衍射光栅产生转动,实现激光频率调谐输出^[4]。由于PZT具有的迟滞特性,使光频率输出呈非线性变化,激光频率变化率 $\beta(t)$ 不再为一个定值。

由(5)式可知,当 $\beta(t)$ 是一个时变参数时,F-P标准具透射峰值时间间隔 Δt 将随 $\beta(t)$ 的变化而变化。由(3)式可知,当激光频率输出非线性时,干涉信号频率将随着 $\beta(t)$ 的变化而变化,呈现非平稳信号特性。利用离散傅里叶变换(DFT)对干涉信号进行频谱分析,不考虑干涉信号中的直流分量,干涉信号的表达式为

$$I(t) = A \cos[2\pi f(t) \cdot t + \theta], \quad (6)$$

式中 $A = 2\sqrt{I_1 \cdot I_2}$, $\theta = 2\pi f_0 \tau$ 。

设矩形窗函数 $\delta_r(t)$ 的长度为 T ,其表达式为

$$\delta_r(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (7)$$

设 T_s 为采样周期,周期内的离散采样点数为 N ,对应的采样时间序列 $\{t_n\}, (n = 1, 2, 3, \dots, N)$,利用DFT得到的离散频谱分辨率为 $1/T_s$,且频谱上等间隔的频率点对应的频率大小为 n/T_s 。设干涉信号的频率大小为 $f(t) = \beta(t) \cdot \tau = k/T_s$ ($k \leq N, k \in \mathbb{R}$),忽略变换中负频率谱的影响,利用DFT得到的离散频谱为

$$\overline{I(n)} = AN \frac{\sin[(n-k)\pi]}{(n-k)2\pi} \exp(j\theta) \exp[-j(n-k)\pi]. \quad (8)$$

在满足尼奎斯特采样定理 ($N/T_s \geq 2k/T_s$) 条件下,当 k 为整数时,则

$$\begin{cases} \overline{I(n)} = \frac{AN \exp(j\theta)}{2}, & n = k \\ \overline{I(n)} = 0, & n \neq k \end{cases}. \quad (9)$$

由(9)式可知,当 k 取不同整数时,干涉信号的的频谱为整数(整数值为 k 取整的个数)条竖直谱线;当 $f(t)$ 为定值时,干涉信号的频谱为一条竖直谱线。

当 k 不为整数时,令 $k = k_0 + r$, 其中 k_0 为整数部分, r 为小数部分,此时(8)式的表达式为

$$\overline{I(n)} = AN \frac{\sin[(n - k_0 - r)\pi]}{(n - k_0 - r)2\pi} \exp(j\theta) \exp[-j(n - k_0 - r)\pi] = (-1)^{n-k_0+1} AN \frac{\sin(r\pi)}{(n - k_0 - r)2\pi} \exp(j\theta) \exp[-j(n - k_0 - r)\pi]. \quad (10)$$

由(10)式可知,在 n 的取值范围内,都存在 $\overline{I(n)} \neq 0$, 此时的干涉信号频率 $f(t)$ 将在所有的 N 个频率点上都有分量,利用 DFT 得到信号的频谱分布不再集中在一条谱线上,而是分布在整个频域范围内。当 $n = k_0$ 时, $|\overline{I(n)}| = |\overline{I(k_0)}|$ 附近取得极大值,干涉信号频率 $f(t)$ 在频谱上的分量主要分布在 k_0 附近,即频谱泄漏,频谱泄漏造成信号频谱相互干扰,影响频率的检测精度。

当激光频率非线性输出时,干涉信号的角频率 $f(t) = \beta(t) \cdot \tau$ 将随着 $\beta(t)$ 的变化而变化,干涉信号频率在频谱上的分布为

$$k = \beta(t)\tau T_s. \quad (11)$$

此时干涉信号频率在频谱上对应的位置 k 是一个连续变化的量,干涉信号的频谱分布将主要集中在整数谱线及其附近。提高采样周期 T_s 可以改善频谱的分布范围,但不能消除光频率非线性对频谱分布的影响。因此,干涉频率 f 的检测精度将会降低。

综合以上分析可知,当激光器输出光频率呈现非线性变化时,降低了光频率变化率 $\beta(t)$ 和干涉频率 f 的检测精度,影响了待测距离 L 的准确性。

3 非平稳干涉信号的一阶阶次跟踪

对于由于激光光频率非线性输出引起的非平稳干涉信号,可以采用一阶阶次跟踪方法实现干涉信号的等频率间隔采样,消除频谱泄漏的影响,提高干涉信号频率 f 的检测精度。为了实现等频率间隔采样,首先要获得光频率扫频规律,采用插值的方法获得等频率间隔对应的重采样时间序列。

3.1 光频率变化率 $\beta(t)$ 的求解

当 $\beta(t)$ 是一个时变参数时,需要对光频率进行线性处理,来修正这一时间段内的光频率变化规律。

如图 3 所示,当激光器输出频率连续调谐的光束时,通过对 F-P 标准具的透射光强信号谐振峰值的检测,可得到相邻谐振峰时间间隔序列,由 2.1 节的分析可知,相邻透射峰值点的频率间隔是一个固定值,并对应于 F-P 标准具的自由光谱范围,即 $v_{i+1} - v_i = f_{FSR}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, m - 1$)。峰值点对应的频率即为激光器在该时刻下的扫描频率,利用最小二乘的方法,对输出光频率进行线性拟合,函数的一次项系数作为激光器输出光频率的变化率 β 的修正值。

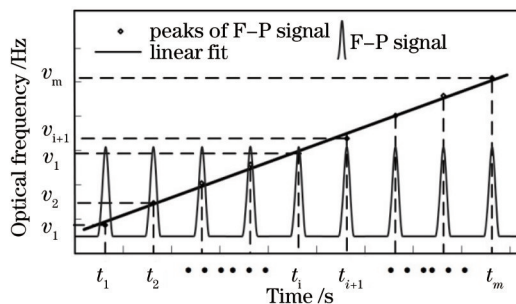


图 3 光频率线性拟合示意图

Fig.3 Diagram of linear fit to the optical frequency

3.2 干涉信号的一阶频率 f 求解

当干涉信号的频率变化时,对非平稳的干涉信号采用一阶阶次跟踪分析的方法,对干涉信号进行等频率间隔采样,可以消除频谱泄漏的影响,提高干涉频率 f 的检测精度。

设透射信号峰值点对应的时间分布为 $\{t_i\}$, ($i = 1, 2, \dots, m$), 第一个峰值点对应的频率大小为 v_1 , 则第 i 个

峰值点对应的扫频间隔为

$$\Delta v_i = v_i - v_1 = (i - 1) \cdot f_{\text{FSR}}, (i = 1, 2, \dots, m). \quad (12)$$

在采样区间 $[t_1, t_m]$ 的时域范围内,对应的激光频率变化范围为 $[v_1, v_m]$ 。设采样区间 $[t_1, t_m]$ 内干涉信号的采样周期为 T_s 采样点数为 N' ,且采样信号为等时间间隔采样。为了重构等频率间隔采样的干涉信号,需要提取等频率间隔点对应的的时间序列。

设等频率间隔采样得到干涉信号的时间序列为 $\{t_{n'}\}$, ($n' = 1, 2, 3, \dots, N'$), 对应激光器输出的光频率大小为

$$v(t_{n'}) = \frac{v_m - v_1}{N'} n' = \beta(t)(t_{n'} - t_1). \quad (13)$$

由(13)式可知,通过对透射峰值 $\{t_i\}$ 序列的光频率信号进行样条插值处理,可以提取等频率间隔的 $\{t_{n'}\}$ 序列的值。对在采样得到的 N' 点干涉信号中,利用插值函数,可以拟合出时间序列 $\{t_{n'}\}$ 对应的干涉信号的值,即重构了等频率间隔采样的干涉信号,如图4所示。

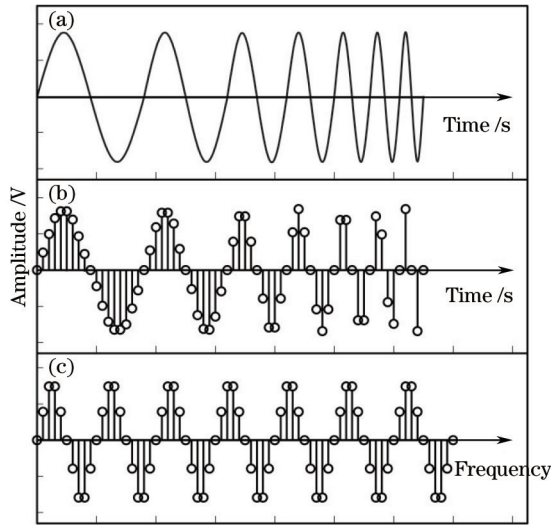


图4 干涉信号采样示意图。(a)连续非平稳干涉信号;(b)等时间间隔采样的干涉信号;(c)重构等频率间隔干涉信号
 Fig.4 Diagram of sample interference signals. (a) Non-stationary interference signal; (b) sample the interference signal with equal time intervals; (c) reconstruct interference signal with equal frequency intervals

由图4可知,通过对干涉信号进行等频率间隔采样,可以将时域内的非平稳信号转化为频域内的平稳信号,避免了由于光频率非线性输出导致的每周期采样点数不同。

当 $n' = N'$ 时, $t_{n'} = t_{N'} = t_m$, (13)式可简化为

$$\frac{v_m - v_1}{N'} N' = v_m - v_1 = \beta(t) T_s'. \quad (14)$$

对重构的干涉信号进行频谱分析,频谱上第 n' 个点对应的离散频率的大小为

$$f' = \frac{n'}{T_s'} = \frac{n'}{(v_m - v_1) / \beta(t)}. \quad (15)$$

由于干涉信号的频率 $f(t) = \beta(t)\tau$ 在频域上的分布 $f(t) = k' / T_s'$ 有

$$k' = (v_m - v_1) \tau. \quad (16)$$

(16)式与(11)式相比,当对重构后的干涉信号进行频谱分析时,信号的频域分布不再包含随时间变化的量 $\beta(t)$, 消除了频谱泄漏的影响,提高了频率检测的分辨率。如图5所示,利用等频率间隔采样的方法,干涉信号频谱的半峰全宽(FWHM)大幅度缩减,即干涉频率的分辨率得到了显著提高。

通过一阶阶次跟踪的方法,对重构的等频率间隔的干涉信号进行频谱分析,能够有效抑制频谱泄漏的干扰,提高干涉频率的分辨率,从而提高待测距离的测量精度。

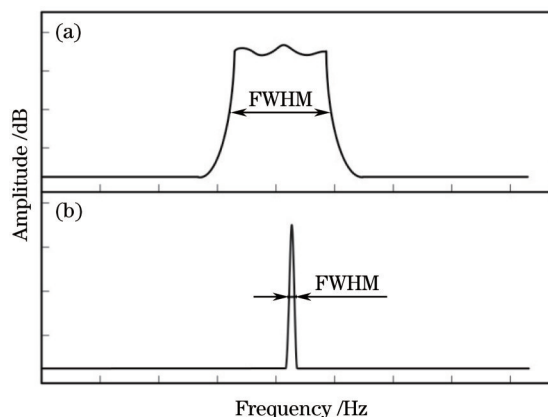


图5 干涉信号的频谱分析图。(a) 等时间间隔采样; (b) 等频率间隔采样

Fig.5 Spectral analysis of interference signals. (a) With equal time intervals; (b) with equal frequency intervals

4 实验分析和验证

4.1 FSI测距系统

在FSI测距实验系统中,采用Newfocus TBL7021可调谐外腔半导体激光器作为光源,其中心波长为1064 nm,无跳模调谐范围为132.5 GHz。利用泰克 AFG3052C 函数发生器生成频率为10 Hz三角波作为PZT驱动信号,通过Thorlabs MDT693APZT控制器来驱动激光器内部的PZT驱动衍射光栅的旋转,实现激光的频率调谐输出。

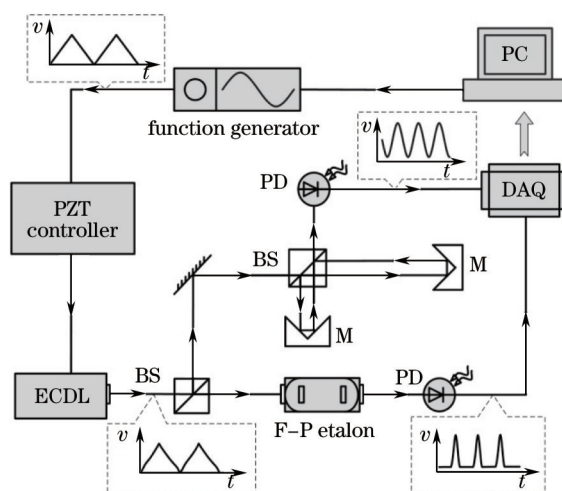


图6 FSI测距系统框图

Fig.6 Diagram of FSI distance measurement system

FSI测距系统如图6所示。利用Thorlabs SA2008B F-P标准具来检测输出的调谐激光信号,其FSR为1.5 GHz。系统采用光电探测器采集透射过F-P标准具的透射信号和测量光路的干涉信号。采用安捷伦1738 A环境传感器监测空气温度、相对湿度、大气压强,根据艾伦公式实时计算空气折射率。采用NI-PXI 6133PXI多通道数据采集卡采集干涉信号,设定采集卡的采样频率为2 MHz。实验中,固定参考镜保持参考光路不变,通过调节目标镜的位置,实现不同待测距离的测量。测距实验利用雷尼绍(Renishaw)XL80(相对测量精度 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$)系列增量式激光干涉仪作为外部基准,将Renishaw激光干涉仪的目标镜与FSI测距系统的目标镜置于同一导轨上进行同步测量,并以Renishaw激光干涉仪对距离增量的测量结果作为测量实验的参考基准。

4.2 实验结果

在FSI测距实验中,PZT驱动采用三角波驱动,分为上升扫频阶段和下降扫频阶段。本文测量时采用上

升扫频阶段,其扫频范围为 132.5 GHz,由于激光器驱动信号波形转折处存在频率跳动,检测得到通过 F-P 标准具产生透射信号的峰值点数为 70,截取中间较稳定的 66 个峰值点作为参考点,采样得到的透射信号与干涉信号如图 7 所示。

对检测到的 F-P 透射信号进行线性拟合,设截取参考信号初始时刻为 0,第一个 F-P 透射峰值对应的光频率间隔为 0,且相邻透射峰值点间的频率间隔为 1.5 GHz,拟合结果如图 8 所示。

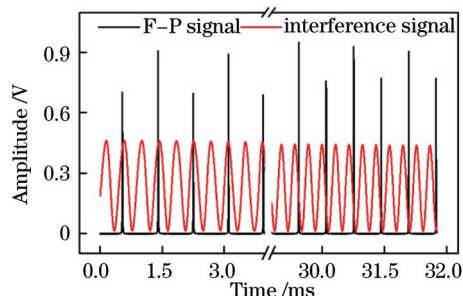


图 7 采样得到的 F-P 透射信号与干涉信号图

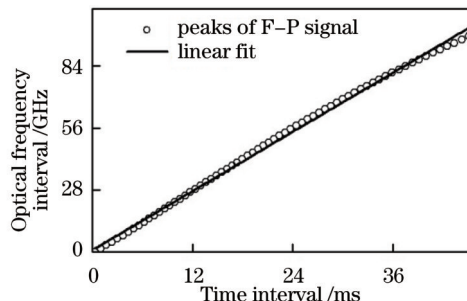


图 8 激光器输出光频率变化图

Fig.7 Measured F-P transmission signal and interference signal

Fig.8 Measured nonlinear optical frequency variation of ECDL

在激光器输出光频率与时间的线性拟合结果中,线性回归的相关指数 $R^2 = 0.99752$,激光器输出光频率存在明显的非线性关系。由函数发生器的驱动频率以及激光器的调谐范围可知,理论上激光输出光频率在上升周期的变化率为 2.64 GHz/ms。实际光频率呈现非线性变化,利用线性拟合的方法,计算得到修正后的光频率变化率为 2.24 GHz/ms。

选取相同时间段的干涉信号进行频谱分析。图 9 表示两种不同采样方法得到的干涉信号的频谱图。其中,图 9(a)表示等时间间隔采样得到干涉信号的频谱,计算可知其 FWHM 的分辨率为 45.8 mm,图 9(b)表示等频率间隔采样得到干涉信号的频谱,其 FWHM 的分辨率降至 1.2 mm。代入修正后的光频变化率值 β 和干涉信号频率值 f ,计算待测距离值为 197.8 mm。采用等频率间隔采样的方法可以显著提高待测距离的精度,此时测量结果的空间分辨率提高了 38 倍。

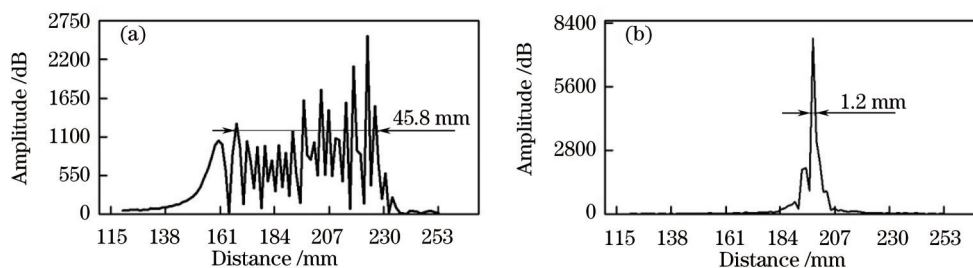


图 9 (a) 等时间间隔采样的干涉信号频谱图; (b) 等频率间隔采样的干涉信号频谱图

Fig.9 (a) Spectrum of equally time intervals interference signal; (b) spectrum of equidistant frequency intervals interference signal

调整目标镜的位置,比较不同距离条件下测量精度的变化规律。

表 1 1000 mm 测量距离内空间分辨率提高倍数

Table 1 Times of enhancement in spatial resolution in the range of 1000 mm

Number	Absolute distance /mm	Times of enhancement in spatial resolution
1	197.8	38.2
2	286.5	37.6
3	361.4	38.1
4	442.6	37.1
5	531.4	36.6
6	620.7	37.3
7	712.3	36.9
8	784.5	37.9
9	876.9	37.2
10	964.3	36.8

表 1 所示为不同测量距离条件下空间分辨率的提高倍数。在 1000 mm 的测量距离内,通过调整目标镜的位置来改变待测距离,进行了 10 组不同距离条件下的测量。利用 FSI 测距系统对每个测点进行 10 次重复测量,以 10 次测量的平均值作为该测点的最终测量结果。由表 1 可知,在不同的待测距离条件下,利用一阶频率跟踪的方法,可以显著提高待测距离的测量精度,并能使测量结果的空间分辨率至少提高 36 倍。

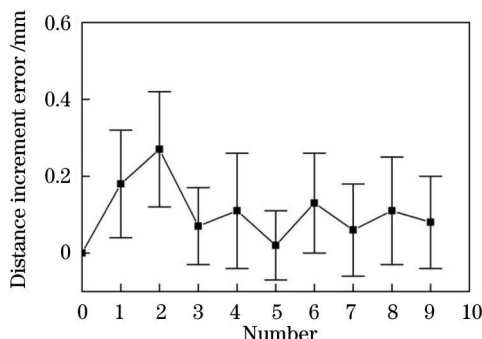


图 10 以雷尼绍增量式激光干涉仪为参考基准的 FSI 测距系统残余误差棒图

Fig.10 Residual error of the FSI system compared with a reference Renishaw incremental interferometer

FSI 测距系统的测量误差棒图如图 9 所示。在利用 FSI 测距系统对 10 个测点进行绝对距离测量,通过对相邻测点测量值相减得到 9 组增量值。图 9 中的方形点表示每个距离增量均值分别与对应的激光干涉仪参考测量值作差后,得到的 FSI 系统测量残余误差值;误差棒表示 FSI 系统的每组增量值所对应的 10 次独立测量的标准差。由图 9 所示,FSI 测距系统的残余误差小于 0.3 mm,测量标准差小于 0.2 mm。

由(14)式可知,利用频谱分析得到距离测量的空间分辨率为

$$\Delta L = \frac{c}{2n_g \beta} \Delta f, \quad (17)$$

式中频率分辨率 Δf 为

$$\Delta f = f_s / N = 1 / N \cdot T_s = 1 / T, \quad (18)$$

式中 f_s 为数据采集卡的采样频率, N 为采样点数, T 为采样时长,即为 FSI 系统激光器的光频连续无跳模调谐范围对应的扫描时间,故 $T \cdot \beta$ 为激光器的光频连续无跳模调谐范围 f_{MHF} ,将(18)式代入(17)式可得系统空间分辨率为 $\Delta L = \frac{c}{2n_g \cdot f_{\text{MHF}}}$,因此系统的理论空间分辨率受限于所采用的激光器光频连续无跳模调谐范围。

目前的测距系统空间分辨率虽然通过本文所提出的新方法得到了显著提高,但依然存在较大的改善空间。在后续的工作中可针对可调谐外腔半导体激光器开展研究,通过提高其光频连续无跳模调谐范围,从而进一步改善测距系统的空间分辨率。相关研究工作目前已经在本课题组得到了深入开展。

5 结 论

研究了 FSI 测距光频率非线性输出对测量精度的影响,提出了一种非平稳干涉信号阶次跟踪抑制激光频率非线性输出的新方法。该方法采用 F-P 标准具,利用激光的透射信号实现对激光器输出频率进行检测。通过最小二乘的方法,对激光频率进行线性拟合,实现了激光器频率的非线性输出的修正。利用阶次跟踪的方法,对非平稳的干涉信号进行频率等间隔采样,并对重构出的干涉信号进行频谱分析,大幅度提高了干涉频率的分辨率。在 1000 mm 的测量距离内,测量结果的空间分辨率能够提高 36 倍以上。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Tao Long, Liu Zhigang, Lü Tao, *et al.*. Drift error compensation method of frequency sweeping interferometer by consecutive forward and reverse optical frequency scanning[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212002.

- 陶 龙, 刘志刚, 吕 涛, 等. 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212002.
- 3 Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Appl Opt, 2004, 43(21): 4189-4198.
- 4 Liu Xin. Testing and Analyzing on Characteristic of PZT[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
- 刘 欣. 压电陶瓷(PZT)特性的分析及实验测试[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- 5 Li Guoyu, Yang Kang, Li Yan, *et al.*. Linear tunable distributed Bragg reflector fiber laser based on the piezoelectric ceramics[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s114011.
- 李国玉, 杨 康, 李 燕, 等. 基于压电陶瓷的线性可调谐分布式布拉格反射光纤激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s114011.
- 6 Xu Zhiwei, Tong Shoufeng. Laser communication and the study of the PZT actuator nonlinearity of the fine tracking[J]. Chinese Science and Technology Review, 2011, (32): 523-524.
- 徐智伟, 佟首峰. 激光通信精跟踪中 PZT 驱动器非线性性的研究[J]. 中国科技博览, 2011, (32): 523-524.
- 7 Liu Zhibo, Li Yang, Su Yun, *et al.*. Measurement and verification of the modulation coefficient of the optical phase modulator based on piezoelectric[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706014.
- 刘志波, 李 阳, 苏 耘, 等. 基于压电陶瓷的光相位调制器的调制系数测量及验证[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706014.
- 8 Tang Weijie, Fu Lei, Chen Shufen, *et al.*. Realization of measuring micro-vibration based on phase generated carrier modulation-demodulation method and interference analysis[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214001.
- 唐伟杰, 付 雷, 陈淑芬, 等. 相位生成载波调制解调法测量微振动的实现及干扰分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214001.
- 9 Li Chuncheng, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. A novel Fabry-Pérot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.
- 李春成, 王 鸣, 夏 巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- 10 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方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(5): 104-109.
- 11 Soller B, Gifford D, Wolfe M, *et al.*. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. Opt Express, 2005, 13 (2): 666-674.
- 12 Ahn T-J, Lee JY, Kim DY. Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation[J]. Appl Opt, 2005, 44 (35): 7630-7634.
- 13 Ahn TJ, Kim DY. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation[J]. Appl Opt, 2007, 46 (13): 2394-2400.
- 14 Gong H, Liu ZG, Zhou YL, *et al.*. Extending the mode-hop-free tuning range of an external-cavity diode laser by synchronous tuning with mode matching[J]. Appl Opt, 2014, 53 (33): 7878-7884.

栏目编辑: 何卓铭