

基于振动抑制高精度宽带激光扫频干涉测量方法

刘国栋 许新科 刘炳国 陈凤东 胡涛 路程 甘雨

A method of suppressing vibration for high precision broadband laser frequency scanning interferometry

Liu Guo-Dong Xu Xin-Ke Liu Bing-Guo Chen Feng-Dong Hu Tao Lu Cheng Gan Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 209501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.209501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.209501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光光源线宽对外差探测性能的影响

Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection

物理学报.2016, 65(8): 084206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084206>

基于光纤色散相位补偿的高分辨率激光频率扫描干涉测量研究

High-resolution laser frequency scanning interferometer based on fiber dispersion phase compensation

物理学报.2015, 64(21): 219501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.219501>

高分辨率调频连续波激光绝对测距研究

Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser

物理学报.2014, 63(18): 184209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184209>

阵列型微波黑体的发射率分析

Emissivity study of the array shaped blackbody in the microwave band

物理学报.2012, 61(16): 164211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164211>

基于振动抑制高精度宽带激光扫频干涉测量方法^{*}

刘国栋 许新科 刘炳国 陈凤东 胡涛 路程 甘雨[†]

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2016年5月10日收到; 2016年5月17日收到修改稿)

本文研究了基于振动抑制的高精度宽带激光扫频干涉测量方法. 在激光扫频干涉测量中振动引起目标位移, 导致在测量信号拍频中叠加了多普勒频移, 该频移量通常远大于目标实际位移产生的频率变化, 直接计算目标距离将造成测距精度下降. 为解决该问题, 本文首先建立了振动对宽带激光扫频干涉测距系统的影响模型, 分析了振动对测距的影响机理, 通过对测量系统的色散失配效应进行补偿降低了色散影响, 然后对测量信号进行交叠分时 Chirp Z 变换计算不同时刻目标距离, 进一步结合卡尔曼滤波方法对目标距离信息进行状态估计, 使测量的标准差由 $185.4 \mu\text{m}$ 降低到 $9.0 \mu\text{m}$, 有效降低了环境振动对测量结果的影响, 提高了测量精度. 该方法在不需改变激光扫频干涉绝对距离测量装置的前提下, 为进一步提高振动环境中的测距精度提供了解决方法, 降低了装置复杂度和成本.

关键词: 干涉仪, 激光频率扫描干涉仪, 激光测距, 振动

PACS: 95.75.Kk, 42.79.Qx, 42.60.Fc, 43.40.Yq

DOI: 10.7498/aps.65.209501

1 引言

激光扫频干涉测量技术^[1-4]具有无测距盲区、测距精度高、可用于非合作目标等优点, 因而, 在物体形貌重构、工业产品装配、计量等领域发挥着重要作用. 激光扫频干涉仪通过测量目标形成的拍频, 可以解算出目标的距离, 然而, 实际中振动使目标产生位移, 在测量信号拍频中引入多普勒频移, 导致直接计算目标距离的精度下降. 为降低振动对激光扫频干涉测量影响, 2007年, 密歇根大学的 Yang 等^[5]采用两个调频范围分别为 665.1 到 675.2 nm 和 669.2 到 679.3 nm 的激光器对 41 cm 处的目标进行测量, 利用两个激光器的测距信息解算目标的实际距离, 结果显示振动消除前后的测量精度分别为 5.7 和 $0.2 \mu\text{m}$. Swinkels 等^[6]采用单个激光器进行三角波扫频, 并利用四个扫频周期数据的相位信息进行混合运算, 抵消振动对测量的影响, 该方法适合于振动较为平缓的情况, 另外在

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. 李志栋等^[7]提出采用 He-Ne 激光器与两个声光调制器测量目标位移量, 将偏移量补偿激光扫频干涉仪的测量结果, 通过对几十米范围的目标振动补偿仿真, 理论上可实现几十微米的测量精度. Seiichi 和 Yasuhiko^[8]采用一对扫频方向相反的垂直腔面发射激光器进行测距, 测距值的微小动态漂移通过两个干涉信号相移平均得到消除, 提高了测距精度.

本文构建了宽带外腔激光扫频干涉绝对距离测量装置, 建立了振动对激光扫频干涉测距的影响模型. 宽带外腔调频激光器扫频带宽较大且扫频周期较长, 导致采用多周期扫频难以反映目标振动变化, 为解决该问题, 本文提出将单次扫频周期的测量信号进行分段, 通过将宽带激光扫频干涉测量信号进行交叠分时线性调频 Z (Chirp Z) 变换^[9,10]得到所有时刻的测距值, 进一步结合卡尔曼滤波方法, 可实现激光器单次扫频降低环境振动对测量的影响, 该方法在不需改变激光扫频干涉绝对距离

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 51275120, 61275096) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ganyu@hit.edu.cn

测量装置的前提下, 为进一步提高振动环境中的测距精度提供了解决方法, 降低了装置复杂度和成本.

2 理 论

2.1 环境振动对宽带外腔激光扫频干涉绝对距离测量影响研究

分析激光扫频干涉绝对距离测量原理. 采用锯齿波对激光器进行线性调频, 则激光器出射光频率为

$$f_L(t) = f_0 + \mu t, \quad (1)$$

其中, f_0 为激光调频起始频率, $\mu = B/T$ 为调频斜率, B 为激光器调频带宽, T 为调频周期, t 为调频时间. 本振光信号为

$$S_L = P_L \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2 \right) \right], \quad (2)$$

其中, P_L 为本振光的振幅, 目标对应的单程时延表示为 τ_m , 由此形成的传输光与本振光发生拍频干涉形成的测量信号为

$$S_b = (P_T P_L \xi_H)^{1/2} \times \cos \left[4\pi (\mu \tau_m t + f_0 \tau_m - \mu \tau_m^2) \right], \quad (3)$$

其中, P_T 为传输光的振幅, ξ_H 为外差干涉效率, 目标形成的拍频为

$$f_m = \frac{2BR}{Tc}, \quad (4)$$

其中, c 为光速, R 为目标距离.

实际中, 激光器扫频特性无法满足理想线性调频, 将导致测量信号的拍频频谱发生展宽, 无法提取目标谱峰, 使测量结果产生很大误差. 为避免该影响, 采用频率采样法^[11,12]对测量信号拍频进行非线性校正. 宽带外腔激光扫频干涉绝对距离测量系统如图 1 所示.

以锯齿波形式对宽带外腔扫频激光器进行线性调频, 经光学隔离器、耦合器 1 后分为两路, 其中 1% 的能量经耦合器 3 (50 : 50) 进入到不等臂长差的光纤马赫泽德干涉光路 (辅助干涉仪), 经过 3 dB 耦合器在平衡探测器 A 上形成拍信号 (时钟信号), 将辅助干涉仪拍信号相位每经过 2π 的时刻作为外部采样时钟接入采集卡. 由耦合器 1 分出的剩余 99% 能量中的 1% 经过本振光路到达平衡探测器 B, 其余光能量经环形器、光纤出射端面、光学发射/接收系统到达目标, 返回后经过 3 dB 耦合器到达平衡探测器 B 并与本振光发生外差干涉, 形成测量拍信号. 测量拍信号经辅助干涉仪拍信号形成的外部采样时钟同步采样后, 其拍频非线性得到校正, 通过对采样后信号进行 Fourier 变换, 进而计算出目标距离.

经频率采样法校正拍频非线性后的测量信号^[13]可表示为

$$I_b \propto \exp \left(j2\pi \frac{2\tau_m}{\tau_{aux}} k \right), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (5)$$

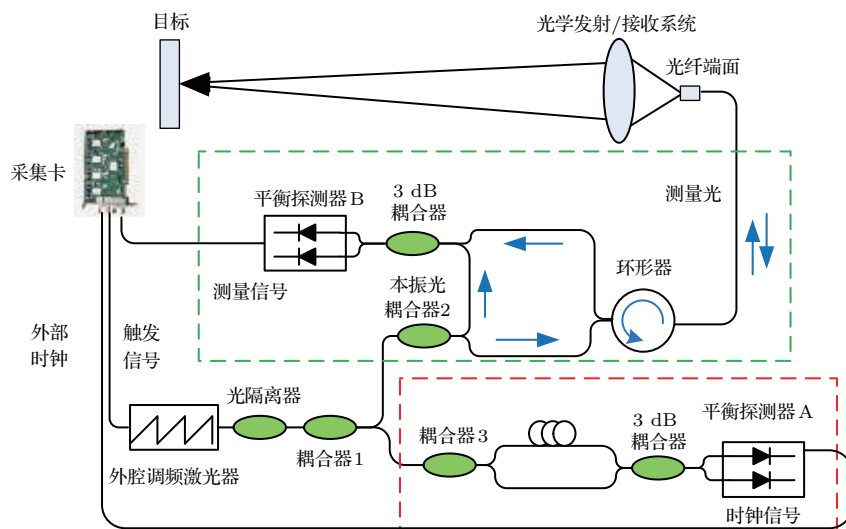


图 1 宽带激光扫频干涉绝对距离测量系统图

Fig. 1. Broadband laser frequency scanning interferometer system.

其中, τ_{aux} 为辅助干涉仪光程差对应的时延, 由(5)式可以看出, 通过预先标定出辅助干涉仪的光程差, 进而通过 Fourier 变换得到目标时延与辅助干涉仪时延比值, 得到目标距离为

$$L_{\text{meas}} = L_{\text{aux}} \frac{\tau_m}{\tau_{\text{aux}}}, \quad (6)$$

其中 L_{aux} 为辅助干涉仪光程, 由于拍频频率与时延成正比, 因此, 测量信号也可以表示为

$$I_b \propto \exp\left(j2\pi \frac{f_m}{f_{\text{aux}}} k\right), \quad (7)$$

其中 f_m 和 f_{aux} 分别表示测量干涉仪和辅助干涉仪对应的拍频, 根据奈奎斯特采样定理, 需要满足 $f_{\text{aux}} \geq 2f_m$.

分析振动对激光扫频干涉仪测量精度的影响. 振动目标形成的拍频为:

$$f_{\text{meas}} = f_m + f_d = 2\mu\tau_m + \frac{2v}{c}f_0, \quad (8)$$

$$f_{\text{aux}} = \mu\tau_{\text{aux}}, \quad (9)$$

其中, f_d 为目标多普勒频移, v 为目标运动速度, f_0 为调频中心频率. 将(8)式和(9)式代入(7)式得到目标光程差为

$$\begin{aligned} L_{\text{meas}} &= L_{\text{aux}} \frac{f_{\text{meas}}}{f_{\text{aux}}} \\ &= L_{\text{aux}} \frac{2\mu\tau_m + \frac{2v}{c}f_0}{\mu\tau_{\text{aux}}} \\ &= L_{\text{aux}} \frac{2\tau_m}{\tau_{\text{aux}}} + L_{\text{aux}} \frac{\frac{2v}{c}f_0}{\mu\tau_{\text{aux}}} \\ &= L_{\text{aux}} \frac{2\tau_m}{\tau_{\text{aux}}} + L_{\text{aux}} \frac{\frac{2vT}{c}f_0}{B\tau_{\text{aux}}}. \end{aligned} \quad (10)$$

进一步对(10)式整理后, 目标距离为

$$L_{\text{meas}} = L_{\text{aux}} \frac{\tau_m}{\tau_{\text{aux}}} \pm L_{\text{aux}} \frac{\tau_0}{\tau_{\text{aux}}} \frac{f_0}{B}, \quad (11)$$

其中 $\tau_0 = vT/c$ 为目标的实际位移, 正负号分别表示目标位移相对激光扫频干涉绝对距离测量装置的正反向, 由(11)式可知, 对于激光扫频干涉绝对距离测量系统, 被测目标的位移被放大了 f_0/B 倍, 导致测量精度下降.

2.2 降低环境振动对宽带激光扫频干涉测距影响研究

为降低环境振动对测量的影响, 本文将卡尔曼滤波与交叠分时 Chirp Z 变换结合对测量结果进行

状态估计. 卡尔曼滤波算法以最小均方误差为估计准则, 通过前一时刻的估计值和当前时刻的观测值更新对状态变量的估计, 计算出当前时刻的估计值. Chirp Z 变换是一种基于 Z 变换的频率细分方法, 通过对某一频率峰值附近的频带进行细分采样, 克服了传统傅里叶变换中的栅栏效应, 可实现快速高精度测频.

假设目标随时间的绝对距离为

$$\begin{aligned} R_{\text{dis}}(t + \Delta T) \\ = R_{\text{dis}}(t) + v_0(t)\Delta T + \frac{1}{2}a(t)\Delta T^2, \end{aligned} \quad (12)$$

式中, ΔT 表示测量信号的分段时间间隔, $v_0(t)$ 表示 t 时刻运动速度, $a(t)$ 表示 t 时刻运动加速度. 因此, 状态变量可表示为

$$\begin{bmatrix} R_{k+1} \\ v_{k+1} \\ a_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & \Delta T^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_k \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} + w_k, \quad (13)$$

其中, 过程噪声 w_k 为高斯白噪声, 其协方差矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \xi_w^2/\Delta T \end{bmatrix}. \quad (14)$$

对于每个测量时间间隔, 观测向量为

$$\mathbf{B}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 \pm \frac{f_i \Delta t}{|\Delta f|} \pm \frac{f_i \Delta t^2}{2|\Delta f|} \\ v_k \\ a_k \end{bmatrix} + \alpha_k, \quad (15)$$

其中, f_i 表示分段信号对应的激光调频中心频率. (15) 式中测量噪声 α_k 为高斯白噪声. α_k 的协方差矩阵为

$$\mathbf{Q}_k = [\xi_\alpha^2/\Delta T]. \quad (16)$$

将上述参数及交叠分时 Chirp Z 变换得到的测距值代入卡尔曼滤波方程, 可以对振动环境中的目标距离进行状态估计. 卡尔曼滤波方程如下.

1) 状态向量预测方程:

$$\mathbf{s}_{k+1}^- = \mathbf{D}\mathbf{s}_k + \alpha_k, \quad (17)$$

其中, $\mathbf{s} = [R \ v \ a]^T$.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & \Delta T^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

2) 状态向量协方差矩阵预测方程:

$$P_{k+1}^- = DP_k D^T + J. \quad (19)$$

3) 卡尔曼加权(增益)矩阵:

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- G^T (G P_{k+1}^- G^T + Q)^{-1}, \quad (20)$$

其中,

$$G = \begin{bmatrix} 1 \pm \frac{f_i \Delta t}{|\Delta f|} \pm \frac{f_i \Delta t^2}{2|\Delta f|} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

4) 状态向量更新方程:

$$s_{k+1} = s_{k+1}^- + K_{k+1}(B_{k+1} - G s_{k+1}^-), \quad (22)$$

其中, s_{k+1} 是后验状态的估计, s_{k+1}^- 是先验状态的估计.

5) 状态向量协方差更新方程:

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1}G)P_{k+1}^-, \quad (23)$$

其中, P_{k+1}^- 和 P_{k+1} 分别表示先验估计误差协方差和后验估计误差协方差.

3 实验结果与讨论

构建宽带激光扫频干涉绝对距离测量装置, 并将其和目标放在气浮光学平台上, 系统的关键部件参数见表 1. 测量目标选择量块, 激光采用下扫频方式, 表明输出波长随时间增加.

表 1 激光扫频干涉测量系统相关参数

Table 1. Parameters of laser frequency scanning interference measurement system.

关键器件	参数	参数设置
激光器	调谐方式	下扫频
	输出功率/mW	3.5
	波长调谐范围/nm	1530—1551
	调谐速度/nm·s ⁻¹	100
	输出线宽/kHz	100
采集卡	触发方式	外触发
	时钟	外部时钟
辅助干涉仪光纤	光程差/m	312.525657

为对比环境振动对测量影响, 首先在光学平台开气浮条件下对目标进行测量, 频谱如图 2 所示, 其中光纤出射端面为激光干涉测量装置的零点位置.

由于激光器为宽带扫频光源, 辅助干涉仪光纤和目标在空气部分存在色散^[14-16]失配效应, 将

导致目标频谱发生展宽, 通过色散啁啾斜率标定方法^[17]计算测量系统色散系数, 并补偿测量信号相位, 可降低色散失配影响, 补偿前后的结果如图 3 所示, 可以看出色散失配补偿前目标频谱发生展宽, 补偿后目标频谱变窄.

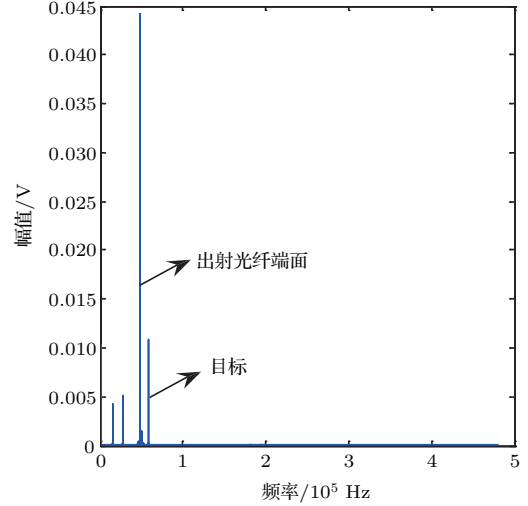


图 2 光学平台开气浮条件下目标频谱图

Fig. 2. Frequency spectrum of target under the condition of open air floatation optical platform.

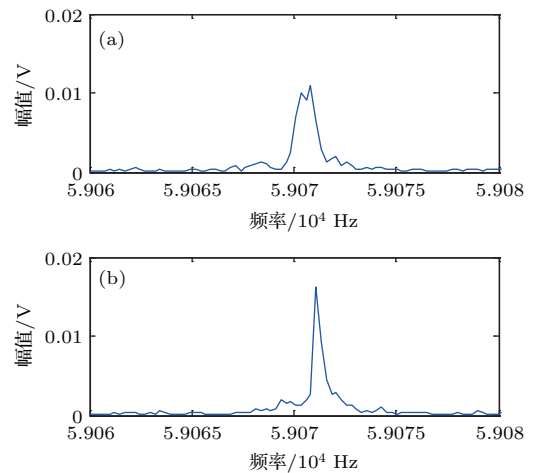


图 3 光学平台开气浮条件下对目标进行色散失配补偿前后频谱图 (a) 色散补偿前频谱图; (b) 色散补偿后频谱图
Fig. 3. The frequency spectrum of target before and after dispersion mismatch compensation under the condition of open air floatation: (a) The frequency spectrum of target before dispersion compensation; (b) the frequency spectrum of target after dispersion mismatch compensation.

在气浮平台关闭条件下, 目标拍频如图 4(a) 所示, 可以看出环境振动导致目标频谱发生展宽. 首先, 采用系统已标定的色散系数对目标频谱进行色散失配补偿, 如图 4(b) 所示, 可以看出对测量系

统的色散失配效应补偿后, 目标频谱仍然存在较大展宽, 该展宽效应由环境振动引起.

为了提取随时间变化的目标拍频, 将 1530—1551 nm 调频带宽的测量信号分为 48 段, 并使每段信号依次重叠 2.5 nm 的信号长度, 则被测目标位移放大 f_0/B 的倍数, 如图 5 所示, 可以看出随着激光器中心波长由 1530 到 1551 nm 扫描, 放大倍数在逐渐减小.

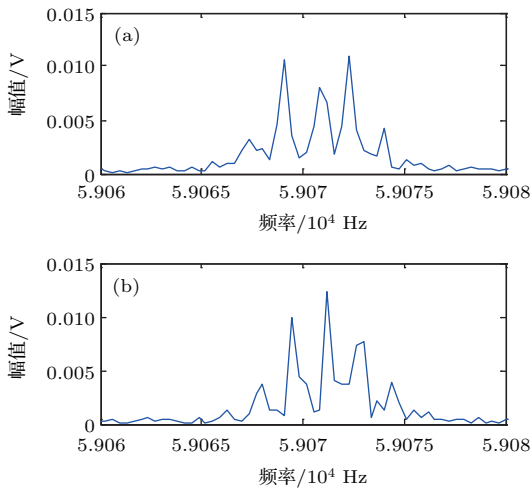


图 4 光学平台关气浮条件下对目标进行色散补偿前后频谱图 (a) 色散补偿前频谱图; (b) 色散补偿后频谱图

Fig. 4. The frequency spectrum of target before and after dispersion mismatch compensation under the condition of close air floatation: (a) The frequency spectrum of target before dispersion compensation; (b) the frequency spectrum of target after dispersion mismatch compensation.

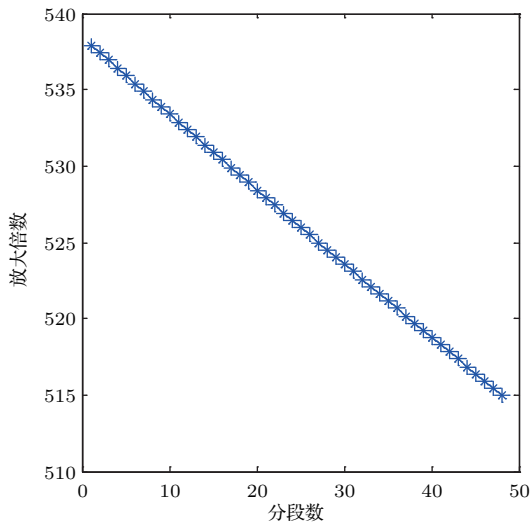


图 5 分段信号的放大倍数

Fig. 5. Magnification of segmented signal.

对分段后的信号进行 Chirp Z 变换的测距结果如图 6 所示, 测量标准差为 185.4 μm . 图 6 右上角

为单段信号的 Chirp Z 变换距离谱图.

对交叠分时 Chirp Z 变换后的测量结果进行卡尔曼滤波的结果如图 7 所示, 统计测量标准差为 9.0 μm , 与未使用卡尔曼滤波的数据相比, 测量标准差降低了 20.6 倍.

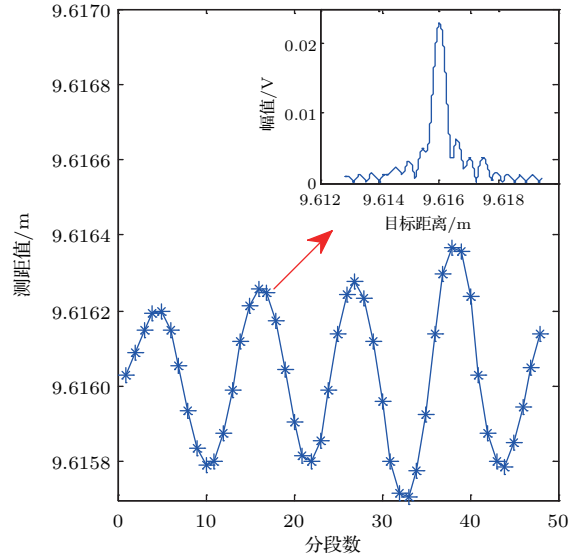


图 6 对目标信号进行交叠分时 Chirp Z 变换后的测量结果

Fig. 6. Measurement results for conducting Chirp Z transform on overlapping segmented signal.

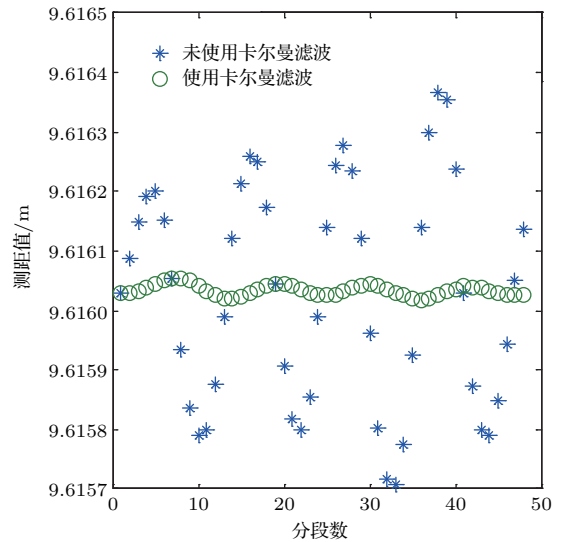


图 7 采用卡尔曼滤波对数据处理的结果

Fig. 7. The result of data processing by Kalman filter.

4 结 论

本文构建了宽带外腔激光扫频干涉绝对距离测量装置, 建立了振动对激光扫频干涉测量系统的影响模型, 通过分析模型可知, 由振动引起的多普

勒频移量通常远大于目标实际位移产生的频率变化, 直接计算目标距离将导致测量精度下降. 为解决该问题, 首先针对宽带激光扫频测距系统存在的色散失配效应, 采用色散啁啾斜率标定方法测量色散系数, 对测量信号相位进行补偿, 降低了色散影响. 其次, 提出将卡尔曼滤波与交叠分时 Chirp Z 变换相结合的方法, 对测距值进行状态估计, 有效提高了测距精度. 该方法在不需要增加额外硬件条件下, 为提高振动环境中宽带外腔激光扫频干涉测距精度提供了解决方法.

感谢浦昭邦教授的指导.

参考文献

- [1] Zheng J 2004 *Appl. Opt.* **43** 4189
- [2] Jack A S, Alois S, Lowell H 1999 *Appl. Opt.* **38** 5981
- [3] Arseny V, Naresh S, Xu S B, George R, Amnon Y 2010 *Appl. Opt.* **49** 1932
- [4] Zeb W B, Wm R B, Brant K, Randy R R, Peter A R 2010 *Appl. Opt.* **49** 213
- [5] Yang H J, Jason D, Sven N, Keith R 2005 *Appl. Opt.* **44** 3937
- [6] Swinkels B L, Bhattacharya N, Braat J J M 2005 *Opt. Lett.* **30** 2242
- [7] Li Z D, Jiang Y S, Sang F, Wang L C, Deng S G, Xin Y, Guo J P 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 144 (in Chinese) [李志栋, 江月松, 桑峰, 王林春, 邓士光, 辛遥, 郭泾平 2011 光学学报 **31** 144]
- [8] Seiichi K, Yasuhiko K 2012 *Opt. Rev.* **19** 376
- [9] Qian K M, Li C Q 2000 *J. Vib. Eng.* **13** 136 (in Chinese) [钱克矛, 李川奇 2000 振动工程学报 **13** 136]
- [10] Mao Y W, Tu Y Q, Xiao W, Yang H Y 2012 *J. Vib. Shock* **31** 112 (in Chinese) [毛育文, 涂亚庆, 肖玮, 杨辉跃 2012 振动与冲击 **31** 112]
- [11] Brian J S, Dawn K G, Matthew S W, Mark E F 2005 *Opt. Express* **13** 666
- [12] Shi G, Zhang F M, Qu X H, Meng X S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 184209 (in Chinese) [时光, 张福民, 曲兴华, 孟祥松 2014 物理学报 **63** 184209]
- [13] Glombitza U, Brinkmeyer E 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 1377
- [14] Govind P A 2013 *Nonlinear Fiber Optics* (5th Ed.) (Oxford: Elsevier) p5785
- [15] Yusuke K, Fan X Y, Fumihiko I, He Z Y, Kazuo H 2013 *J. Lightw. Technol.* **31** 866
- [16] Evan M L, Justin W K, Mark E F, Emily E H 2014 *US Patent* 105911 [2014-07-03]
- [17] Xu X K, Liu G D, Liu B G, Chen F D, Zhuang Z T, Gan Y, Lu C 2015 *Opt. Eng.* **54** 074102

A method of suppressing vibration for high precision broadband laser frequency scanning interferometry*

Liu Guo-Dong Xu Xin-Ke Liu Bing-Guo Chen Feng-Dong Hu Tao Lu Cheng Gan Yu[†]

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 10 May 2016; revised manuscript received 17 May 2016)

Abstract

In the paper we study the method of reducing environmental influence in broadband laser frequency scanning interferometer. Target displacement caused by vibration will result in Doppler shift in measurement beat frequency. The extent of frequency shift is usually much larger than the actual target displacement. So the direct calculating of the target distance will cause ranging precision to decrease. In this paper, we establish a model for the influence of environmental vibration on the measurement and analyze the influence of the vibration on ranging result. To suppress the vibration effect, the Kalman filter is combined with the overlapping Chirp Z transform to estimate the measured data. The general process is described as follows. Firstly, the tuning nonlinearity will lead to the frequency spectrum broadening, so this paper we use the frequency sampling method to correct the frequency modulation nonlinearity of the laser. The frequency sampling method has the advantages of high speed and high precision. Secondly, the measurement system has the dispersion mismatch effect due to the use of broadband frequency swept laser. To solve this problem, the influence of the dispersion on the measurement is reduced by using the method of dispersion chirp slope calibration. Thirdly, because of the long frequency sweep period of the external cavity swept frequency laser, the vibration process of the target cannot be recorded in real time by single sweep, so in this paper we propose segmenting the measurement signal of single sweep and conducting Chirp Z transform to calculate target distance at different times. Compared with FFT algorithm, Chirp Z transform can achieve arbitrary narrow band spectrum subdivision, with the advantages of high accuracy and fast frequency measurement. Lastly, the Chirp Z ranging result is further combined with the method of Kalman filter to estimate the state of the target distance information. The experimental results indicate that the measurement standard is reduced from 185.4 μm to 9 μm by the proposed method. Without changing the absolute distance measuring device of broadband laser frequency scanning interferometer, this method provides a solution for further improving the ranging accuracy in the vibration environment, and reduces the complexity and cost of the device.

Keywords: interferometry, laser frequency scanning interferometer, laser ranging, vibration

PACS: 95.75.Kk, 42.79.Qx, 42.60.Fc, 43.40.Yq

DOI: 10.7498/aps.65.209501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51275120, 61275096).

[†] Corresponding author. E-mail: ganyu@hit.edu.cn