



Institute of Physics, CAS

#### 基于旋转不变技术信号参数估计的激光扫频干涉测量方法

徐靖翔 孔明 许新科

# Laser frequency scanning interferometry based on estimating signal parameters via rotational invariance technique

Xu Jing-Xiang Kong Ming Xu Xin-Ke

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 034205 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201135 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20201135 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

快速傅里叶变换在阿秒束线光路稳定控制中的应用

Phase control and stabilization in attosecond beamline with fast Fourier transform 物理学报. 2019, 68(21): 214204 https://doi.org/10.7498/aps.68.20191164

运动目标激光微多普勒效应平动补偿和微动参数估计

Translation compensation and micro-motion parameter estimation of laser micro-Doppler effect 物理学报. 2018, 67(15): 150701 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172754

基于强耦合Duffing振子的微弱脉冲信号检测与参数估计

Detection and parameter estimation of weak pulse signal based on strongly coupled Duffing oscillators 物理学报. 2019, 68(8): 080501 https://doi.org/10.7498/aps.68.20181856

对称旋转不变相干分布式非圆信号二维波达方向估计

Two-dimensional direction-of-arrival estimation of coherently distributed noncircular signals via symmetric shift invariance 物理学报. 2017, 66(22): 220701 https://doi.org/10.7498/aps.66.220701

基于最大似然的单通道交叠激光微多普勒信号参数分离估计

Separate estimation of laser micro-Doppler parameters based on maximum likelihood schemes 物理学报. 2018, 67(11): 114202 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172639

光频梳频域干涉测距主要参数分析及一种改进的数据处理方法

Analysis of main parameters of spectral interferometry ranging using optical frequency comb and animproved data processing method 物理学报. 2019, 68(19): 190602 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190836

# 基于旋转不变技术信号参数估计的 激光扫频干涉测量方法<sup>\*</sup>

徐靖翔 孔明 许新科\*

(中国计量大学计量测试工程学院,杭州 310018)

(2020年7月16日收到; 2020年9月2日收到修改稿)

激光扫频干涉测量技术具有无测距盲区、非接触、单次测量多目标的能力.通过傅里叶变换可提取目标 拍频频率,进而解算距离.然而受激光器调频带宽限制,通过傅里叶变换得到的目标分辨率受限于固有分辨 率.为解决该问题,本文提出采用基于旋转不变技术的信号参数估计(ESPRIT)算法对测量信号进行频谱分 析.实验通过插值拟合法校正测量信号拍频非线性,进而采用 ESPRIT 算法测量目标距离,结果表明在傅里 叶变换算法无法区分临近目标频率的情况下,采用 ESPRIT 算法可以区分出目标的频率,通过计算可得被测 目标的厚度为 2.08 mm.从而为诸如光纤临近损伤点、薄台阶高度或小孔等测量提供了思路.

**关键词:**激光扫频干涉测量,快速傅里叶变换,基于旋转不变技术的信号参数估计算法 **PACS:** 42.79.Qx, 95.75.Kk, 06.30.Bp, 42.60.-v **DOI:** 10.7498/aps.70.20201135

### 1 引 言

激光测距具有测距范围大、抗干扰能力强、分 辨率高等诸多优点,被广泛应用于光学探测、三维 形貌测量和工业制造等领域.常用的激光测距方法 有光频梳法、干涉法、相位法和脉冲法等.激光扫 频干涉测量技术属于光学干涉测量技术的一种,该 技术将调频测距的原理和激光的优点相结合,可以 实现多目标、非接触、高精度的绝对测距,在工业 制造和科学研究中具有重要的价值<sup>[1-5]</sup>.

激光扫频干涉测量技术作为一种新型相干探 测技术,采用线性调频信号调制激光,对被测目标 的拍频信号进行频谱分析可以获得被测目标的距 离与速度<sup>[6-8]</sup>.该技术的测量分辨率与可调激光器 的调频带宽有关,当激光器的调频带宽达到几十至 上百 GHz 时,测量分辨率可达到毫米级.为了提高 激光测距系统的测量分辨率,可以通过增大激光器 的调频带宽.2001年,Schneider<sup>[9]</sup>利用干涉仪在 反馈环路中补偿激光器的非线性,并采用对称扫 频的方法消除环境带来的振动干扰,在调频带宽为 15 GHz 时的测距精度为毫米级.2010年,Arseny 等<sup>[10]</sup>利用算法将三个可调激光器的光谱相结合, 使扫描范围提高至原来的三倍,从而使测量分辨率 提高了三倍.2011年,于啸等<sup>[11]</sup>对调频连续波雷 达技术的测距测速分辨率进行测试和分析,实验结 果表明该系统的测距精度达到厘米级,测速精度可 达到毫米级.2015年,孟祥松等<sup>[12]</sup>提出了基于重 采样技术的高速测量方法,对多次不同测量的等光 频间隔采样的信号进行拼接,实现了对激光器调制 带宽的拓展,从而提高了测量分辨率.

激光扫频干涉测量技术一般利用快速傅里叶 变换 (FFT) 进行频谱分析, 分辨率与采样频率和 采样点数有关, 提高测量分辨率需要增加采样点

<sup>\*</sup> 浙江省自然科学基金 (批准号: LY19F050008) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xuxinke-123@163.com

<sup>© 2021</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

数.由于受激光器调频带宽限制,采样点数无法任 意增加.为在算法上进一步提高测量分辨率,目前 常用的算法如现代谱估计中的线性预测自回归 (AR)模型法,该算法需要经过多次递推计算才能 确定模型阶数的最优值,增加了计算负担,而且随 着阶数的增加,会导致伪峰的增多.FFT 算法存在 栅栏效应和频谱泄漏,将导致信息的丢失和频谱的 扩大或者混叠,造成频谱分辨率下降.多重信号分 类 (MUSIC)算法需要进行谱峰搜索寻找峰值,这 会带来很大的计算量,该算法通过改变阵元数可在 一定程度上提高分辨率,但会使得运算时间大幅度 增加<sup>[13-19]</sup>.

本文对激光扫频干涉测量原理及拍频非线性 校正方法进行了研究,在此基础上采用信号参数 估计 (ESPRIT) 算法对目标进行测量,该算法与 MUSIC 算法相比具有计算速度快的优点.与 FFT 算法进行对比, ESPRIT 算法能够克服栅栏效应, 可以用于解决测量分辨率受调频带宽限制难以进 一步提高的问题.

2 原 理

#### 2.1 激光扫频干涉测距系统示意图

本文中的激光扫频干涉测距系统如图 1 所示, 分布式反馈 (DFB) 激光器与两个光路相连. 一个 是主光路,用于目标的测量,主要构成为迈克耳孙 干涉仪. 另一个是辅助光路,主要构成是马赫-曾德 尔干涉仪,其输出的信号用于对被测目标的采样信 号进行重采样,目的是校正 DFB 激光器的调频非 线性,两路延迟单模光纤的作用是改变两个光路的 光程. 首先, DFB 激光器 99% 的能量进入主光路, 然后再次经过 99:1 的分束器,将 99% 的能量用于 测量光,剩余的 1% 用于参考光路,两部分信号在 耦合器中耦合后,探测器 1 获得主光路最终的输出 信号.同时, DFB 激光器剩余的 1% 的能量进入辅 助光路后,被 50:50 分束器分为两路,并由探测器 2 接收输出的信号.探测器 1 和探测器 2 将接收到的 光信号转换成电压信号,并将其传输到数据采 集卡.

激光拍频干涉测距原理如图 2 所示. DFB 发 出的线性调频光, 经过分光镜 PBS 后被分为两束. 一束作为本振光, 到达系统内部的反射镜后, 被反 射进入探测器. 一束作为测量光, 达到目标后返回, 在探测器中与本振光发生干涉产生拍频信号<sup>[20-24]</sup>.

激光扫频干涉测量拍频形成的原理如图 3 所示. 假设 DFB 激光器发出的线性调频光频率为

$$f_{L} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\omega_{L}(t)}{2\pi} = \frac{\omega_{0}}{2\pi} + kt = f_{0} + kt, \quad (1)$$
  
式中 $\omega_{0}$ 为调频起始角频率,  $f_{0}$ 为调频起始频率,  $\Omega = 2\pi B$ 为角调频带宽,  $k = B/T_{m}$ 为调频斜率,  $T_{m}$ 为调频周期,  $\omega_{L}(t)$ 为本振光频率, 则主光路中的本振光信号可以表示为

$$I_{\rm L} = A_{\rm L} \cos\left[\varphi\left(t\right)\right] = A_{\rm L} \cos\left[2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\frac{B}{T_{\rm m}}t^2\right)\right],\tag{2}$$

其中AL为振幅. 主光路中的测量光信号为

$$I_{\rm M} = A_{\rm T} \cos \left[ \phi \left( t - 2\tau_t \right) \right]$$
  
=  $A_{\rm T} \cos \left\{ 2\pi \left[ f_0 \left( t - 2\tau_t \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} \left( t - 2\tau_t \right)^2 \right] \right\}, \quad (3)$ 

其中 $A_T$ 为测量光的振幅, c为光速,  $R_t$ 为被测目标 与激光测距系统相距的距离,  $n_{air}$ 是空气折射率,  $\tau_t = R_t n_{air}/c$ .本振光和测量光在探测器中形成的





Fig. 1. Schematic diagram of laser scanning interference ranging system.



图 2 激光拍频干涉测距原理图 (PA, 检偏器)

Fig. 2. Schematic diagram of laser beat frequency interference ranging (PA, polarization analyzer).





Fig. 3. Schematic diagram of beat frequency formation in laser frequency scanning interferometry.

光电流,最终输出可以表示为

$$\begin{split} I_{\rm F} &= I_{\rm a}\xi_{\rm H} = \xi_{\rm H} \left( A_{\rm L}^2 \cos^2 \left[ 2\pi \left( f_0 t + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} t^2 \right) \right] \right. \\ &+ A_{\rm T}^2 \cos^2 \left\{ 2\pi \left[ f_0 \left( t - 2\tau_t \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} \left( t - 2\tau_t \right)^2 \right] \right\} \\ &+ A_{\rm L} A_{\rm T} \cos \left\{ 2\pi \left( f_0 t + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} t^2 \right) \right. \\ &+ 2\pi \left[ f_0 \left( t - 2\tau_t \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} \left( t - 2\tau_t \right)^2 \right] \right\} \\ &+ A_{\rm L} A_{\rm T} \cos \left\{ 2\pi \left( f_0 t + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} t^2 \right) \right. \\ &- 2\pi \left[ f_0 \left( t - 2\tau_t \right) + \frac{1}{2} \frac{B}{T_{\rm m}} \left( t - 2\tau_t \right)^2 \right] \right\} \right), \quad (4) \end{split}$$

式中, *I*a为平均光强, *ξ*H为外差干涉效率. 第一项 和第二项是直流项, 第三项和第四项分别为在探测 器上形成的和频项与差频项. 直流项不含被测目标 的距离信息, 通过带通滤波器可将其滤除. 和频项 其频率超过探测器的响应范围, 该项可不考虑. 差 频项为本振光与测量光光频之差, 当频差小于探测 器的截止频率时, 有光电流输出. 可表示为

$$I_{O} = A_{L}A_{T}\xi_{H}\cos\left[4\pi\left(\frac{B}{T_{m}}t\tau_{t}+f_{0}\tau_{t}-\frac{B}{T_{m}}\tau_{t}^{2}\right)\right].$$
 (5)  
(5) 式表明测量信号为余弦形式的信号. 对其

进行频谱变换可以得到被测目标的拍频频率  $f_b = 2R_t n_{air} B / (cT_m)$ .

快速傅里叶变换的频谱分辨率为 $\Delta f_b = 1/T_m$ , 代入 (5)式可以得到激光扫频干涉绝对距离测量 的分辨率为<sup>[25]</sup>

$$\Delta R = \frac{c}{2n_{\rm air}B}.\tag{6}$$

#### 2.2 插值拟合法理论模型

为了校正 DFB 激光器的调频非线性对测量的 影响,本次实验采用插值拟合法对测量光信号进行 非线性校正,该方法的理论模型如下.设辅助光路 中由延迟单模光纤形成的光纤长度差为 $R_1$ ,折射 率为 $n_1$ ,形成的时间延迟为 $\tau_1 = R_1n_1/c$ ,则辅助 光路中的信号可以表示为

$$I_{\rm L}' = A_{\rm L} A_{\rm T} \xi_{\rm H} \cos\left[2\pi f\left(t\right)\tau_1\right],\tag{7}$$

其中 f (t)是激光器的瞬时频率. 将该信号对主光路中的信号做插值拟合法, 时刻选择的是 l' 每经过一个周期上升沿的过零点时刻, 即 l' = 0时, 可以得到

$$I'_{\rm L} = A_{\rm L} A_{\rm T} \xi_{\rm H} \cos \left[ 2\pi f\left(t\right) \tau_1 \right] = 0, \tag{8}$$

$$2\pi f(t) \tau_1 = 2\pi k + \frac{\pi}{2}, \ 0 \le k \le N - 1, \qquad (9)$$

N是辅助光路信号过零点的个数,进而可以得到

$$f(t) = \left(k + \frac{1}{4}\right)\frac{1}{\tau_1}.$$
 (10)

主光路中延迟单模光纤形成的光纤长度差为  $R_2$ , 折射率同样为 $n_1$ , 在拍信号中形成的时间延迟 为 $\tau_2 = R_2 n_1/c$ .由于主光路和辅助光路中的激光 信号来自于同一个激光器, 因此同一时刻下两光路 中信号的瞬时频率相同, 主光路的信号可以表示为

式中的  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ 为常数项, 当  $R_t$ 确定时,  $\tau_t$ 也是一个 定值. (12) 式表明经过插值拟合法对测量信号进行 非线性校正以后, 测量信号变成了以 k 为自变量的 余弦信号, 与激光器瞬时频率 f(t)无关, 即采用插 值拟合法可以校正测量信号的拍频非线性.

#### 2.3 ESPRIT 算法原理

由上述分析可知,测量信号为余弦信号,为提 高测量分辨率,本文提出采用现代谱估计中的 ESPRIT 算法进行频谱分析. 经典谱估计以傅里叶 变换为基础,该方法是将数据工作区以外的未知数 据假设为零,相当于数据加窗,这并不符合实际. 与经典谱估计相比,现代谱估计是通过观测数据估 计参数模型,再按照求参数模型输出功率的方法 估计信号功率谱,进而提高了谱估计的分辨率. ESPRIT 算法的具体原理如下.

设测量信号 x (n) 可以表示为一系列幅值按指数规律变化的余弦信号与白噪声的组合, 当该信号 入射到一个有 M个阵元的平面阵列上, 在采样时刻 n, 其输出数据的矩阵模型如下:

$$x(n) = \sum_{p=1}^{p} a_{p} e^{j\phi_{p}} e^{(-\sigma_{p}+j\omega_{p})nT_{s}} + w(n), \qquad (13)$$

式中 $T_s$ 为采样周期;  $a_p$ ,  $\phi_p$ ,  $\omega_p$ ,  $\sigma_p$ 是第p个衰减 分量的幅值、初始相位、频率和衰减系数; w(n)为 噪声.

根据观测数据序列x(0), x(1), ..., x(N-1)构造出一个 Hankel 数据矩阵:

$$\mathbf{X} = [x(0), x(1), \dots, x(L-1)]^{\mathrm{T}}$$
$$= \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix}. (14)$$

令 $Y = [y_1, y_2, \cdots, y_p], A = [a_1 e^{j\varphi_1}, a_2 e^{j\varphi_2}, \cdots, a_n e^{j\varphi_p}]^{\mathrm{T}},$ 可将 (13) 式改为

$$x(n) = Y \boldsymbol{\Phi}^n A + w(n), \qquad (15)$$

式中y为频率向量, $\Phi$ 为旋转矩阵,

$$\boldsymbol{y} = \left[1, \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_1 T_{\mathrm{s}}}, \cdots, \mathrm{e}^{(M-1)\mathrm{j}\omega_1 T_{\mathrm{s}}}\right]^{\mathrm{T}}, \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \operatorname{diag}\left(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{1}}, \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{2}}, \cdots, \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{p}}\right), \qquad (17)$$

其中 $j\omega_1, j\omega_2, \dots, j\omega_p$ 是(13)式中的频率. 设 $U_1, U_2$ 是两个交错的长度为M - 1的数据矩阵, 视为长度 为M的数据矩阵的子窗口, 有

$$\boldsymbol{U}_1 = \boldsymbol{Y}_{M-1} \boldsymbol{\varPhi}^n \boldsymbol{A}, \tag{18}$$

$$\boldsymbol{U}_2 = \boldsymbol{Y}_{M-1} \boldsymbol{\varPhi}^{n+1} \boldsymbol{A}, \qquad (19)$$

 $\boldsymbol{U}_2 = \boldsymbol{U}_1 \boldsymbol{\varPhi}. \tag{20}$ 

为了在较少数据长度下,该算法仍有较高的分 辨率,采用奇异值分解的方法,矩阵 X 进行奇异值 分解:

$$\boldsymbol{X} \stackrel{\text{svd}}{=} \boldsymbol{U} \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{V}^{\text{H}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{\text{s}} & \boldsymbol{U}_{\text{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{\text{s}} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Sigma}_{\text{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{\text{s}}^{\text{H}} \\ \boldsymbol{V}_{\text{n}}^{\text{H}} \end{bmatrix},$$
(21)

式中的<sup>svd</sup>表示奇异值分解;  $U^{H}U = I$ ,  $V^{H}V = I$ , 其中 $U \in C^{L \times L}$ ,  $V \in C^{M \times M}$ ,  $\Sigma \in R^{L \times M}$ 是一对 角阵, 各元素是矩阵 X 的奇异值 $\xi_1, \xi_2, ..., \xi_p, ...,$  $\xi_{max}(L, M)$ 的降序排列;  $V_s 和 V_n$ 分别是信号子空 间和噪声子空间.

令 $V_1$ ,  $V_2$ 分别是 $V_s$ 删除最后一行和第一行后 得到的新矩阵,存在旋转矩阵 $\Psi$ ,使得

$$\boldsymbol{V}_2 = \boldsymbol{V}_1 \boldsymbol{\Psi}. \tag{22}$$

由 (20) 式和 (22) 式可知, 矩阵  $\Phi$  中的对角元素即 是 $\Psi$ 的特征值, 考虑到噪声和干扰误差等因素, 用  $E_1, E_2$ 分别表示 $V_1, V_2$ 的误差, (22) 式可改为

$$\boldsymbol{V}_2 + \boldsymbol{E}_2 = (\boldsymbol{V}_1 + \boldsymbol{E}_1)\boldsymbol{\Psi}.$$
 (23)

运用最小二乘法求出 $\Psi$ 的最优解使 (23) 式成 立,同时使得误差矩阵 $E_1 和 E_2$ 的总体误差最小, 最终可以求得频率 $f = \frac{\omega_p}{2\pi T_c}$ .

## 3 实验及结果

为了验证 ESPRIT 算法的有效性,搭建了如 图 1 所示的激光测距系统对目标进行测量,其中使 用的 DFB 激光器光源波长为 1550 nm,调频带宽 为 60 GHz,测量目标为前表面镀膜的反射镜,根 据 (6) 式,可以求得测距系统的分辨率为 2.50 mm. 对目标进行测量时,数据采集卡同时采集主光路的 信号和辅助光路的信号,利用辅助光路中的信号对 测量信号进行插值拟合,从而消除测量信号的拍频 非线性.

对被测目标进行测量前,首先采用插值拟合法 进行非线性的校正.对未经过插值拟合法进行非线 性校正的被测信号做频谱分析,如图4所示,可以 看出测量信号由于 DFB 激光器的非线性导致了频 谱展宽,使得无法准确提取出目标频谱中心频率.

图 5 是非线性校正前的测量信号的时频图,可 以看出随着时间的增加,频率也随之改变,这一变 化是由激光器的调频非线性造成的.

可得



图 4 未采用插值拟合时信号的频谱图

Fig. 4. Spectral diagram of the signal without interpolation fitting.



图 5 未采用插值拟合信号的时频图 Fig. 5. Time-frequency diagram of the signal without interpolation fitting.

对测量信号做非线性校正,经过插值拟合法校 正后得到的新信号如图 6 所示,可以看到图中有一 个明显的单一尖峰,保证了提取目标频率的稳定 性.通过对比图 4 和图 6,可以看出采用插值拟合 法后,大幅度减小了测量信号的频谱展宽,表明对 测量信号进行插值拟合法的非线性校正方法是可 行的.

校正非线性后的时频图如图 7 所示,可以看出 测量信号经过非线性校正后,频率随时间的增加保 持稳定.

调整准直镜头,将一个前表面镀膜的反射镜紧 密夹在三坐标机械臂上.机械臂移动不同的距离, 每段移动的距离由三坐标测量机测量给出,同时使 用激光测距系统在每段距离的起点和终点对反射 镜进行测量,采用 FFT, MUSIC 和 ESPRIT 三种 算法对应的测量结果如表 1 所列.

由表 1 可知, ESPRIT 算法与 FFT 计算得到的结果与三坐标测量机给出的结果相比,最大误差



图 6 采用插值拟合后信号的频谱图

Fig. 6. Spectral diagram of the signal with interpolation fitting.



图 7 采用插值拟合后信号的时频图

Fig. 7. Time-frequency diagram of the signal with interpolation fitting.

#### 是 0.016 mm.

对双目标进行测量时,调整镜头的角度至光斑 照射在双目标的交界处,此时能同时获得两个测距 值.对三组不同厚度的双目标进行测量,ESPRIT 算法的测量结果与实际厚度的比较如表2所列.

由表 2 可知, ESPRIT 算法计算得到的结果与 三坐标测量机测量的实际厚度相比,误差在 20—

表 1 不同距离下三种算法的测量结果与实际距 离的比较

Table 1. Comparison of the measurement results of three algorithms and the actual distance under different distances.

实际距 离/mm	FFT算法 误差/mm	MUSIC算法 误差/mm	ESPRIT算法 误差/mm
127.633	-0.005	-0.328	0.007
100.797	-0.013	0.600	0.012
109.165	-0.010	0.230	0.009
99.154	0.003	-0.093	-0.002
124.060	-0.016	-0.621	0.014

#### 表 2 ESPRIT 算法对不同厚度的双目标的测量 结果与实际厚度的比较

Table 2. Comparison of the measurement results of the ESPRIT algorithm with the actual thickness of dual targets.

实际厚度/mm	ESPRIT测量结果/mm	误差/mm
15.362	15.327	-0.035
20.291	20.316	0.025
24.144	24.182	0.038



图 8 被测目标的频谱图 Fig. 8. Spectral diagram of the measured target.

40 µm 之间.

经过上述对比,本文采用 ESPRIT 算法对被 测目标进行频谱分析.被测目标由两个前表面镀膜 的反射镜构成,将两反射镜紧密夹在三坐标测量机 的机械臂上,对两反射镜交界处进行测量,然后对 获得的信号进行频谱分析.由 FFT 算法得到的测 量结果如图 8 所示,图中左侧的尖峰代表的是测量 系统的光纤出射端面,右侧的单一尖峰是被测目 标.由于被测目标由两个反射镜构成,理论上在经 过频谱分析后会获得两个尖峰,但从图中可以看出 只有一个尖峰,这是由于被测目标之间的距离小于 测距系统的分辨率.

为了解决该问题,区分出被测目标的两个尖峰 从而获得其中心频率,采用 ESPRIT 算法对测量 信号进行计算与分析,得到被测目标的中心频率, 如图 9 所示.由于只需要被测目标的频率信息,为 了方便计算将幅值信息进行了归一化.

根据 ESPRIT 算法得到的结果, 通过计算可得到被测目标的厚度为 2.08 mm.

实验时,环境温度、湿度和气压变化会导致空 气折射率 nair 改变,将导致测距值的变化.实验室 中能保持相对稳定的温度、湿度与气压,经过分析,





折射率nair带来的相对测量不确定度接近1×10<sup>-6</sup>.

辅助光路中光纤的长度及折射率会受到环境 温度的影响而变化,该误差将通过拍频非线性校正 影响测距值.对该过程的分析如下,不同温度的光 纤由其长度改变及线热膨胀引起的光程变化量为

 $\Delta R_{1} = R_{1} (T_{a}) [g(x) T_{z} + D_{n}] (T - T_{a}), \qquad (24)$ 

其中 $R_1(T_a)$ 是 $T_a$ 温度下辅助光路中光纤的长度,  $T_a$ 表示某一恒定温度, g(x)为光纤折射率与温度相关的函数,  $T_z = 5.5 \times 10^{-7} / \mathbb{C}$ 为光纤的线热膨胀系数,  $D_n$ 为光纤折射率的温度系数, T为当前温度.

R(T<sub>a</sub>)为T<sub>a</sub>温度下被测目标相距的长度,当环 境温度从T<sub>a</sub>改变至T时,被测目标的时延τ<sub>t</sub>与辅助 光路的时延τ<sub>1</sub>的比值为

$$\frac{\tau_t}{\tau_1 + \Delta \tau_1} = \frac{\tau_t}{\tau_1} \left[ 1 - \frac{\Delta \tau_1}{\tau_1} + O\left(\frac{\Delta \tau_1}{\tau_1}\right)^m \right], \quad (25)$$

只保留一次项,将(24)式代入可得

$$\frac{\tau_t}{\tau_1 + \Delta \tau_1} = \frac{\tau_t}{\tau_1} \left( 1 - \frac{\Delta \tau_1}{\tau_1} \right) 
= \frac{R(T_a)}{R_1(T_a) g(x)} \left\{ 1 - \frac{[g(x) T_z + D_n] (T - T_a)}{g(x)} \right\}.$$
(26)

对被测目标进行测量的误差为

$$\Delta R = -\frac{R(T_{a})[g(x)T_{z} + D_{n}]}{2g(x)}(T - T_{a}). \quad (27)$$

(27) 式表明光纤的长度和折射率受到温度变化的影响,温度每变化一度,光纤光程的变化量为0.009 mm/m.温度升高,被测目标测量的误差也随之增大,且与被测目标相距越远,误差越大.

## 4 结 论

本文采用 ESPRIT 算法来提高激光测距系统

的分辨率. 首先研究了激光扫频干涉测量的原理, 搭建了双干涉光路的激光测距系统. 本次实验利用 辅助光路的信号对主光路的测量信号进行插值拟 合的方法, 从而消除测量信号的拍频非线性. 接着 利用 ESPRIT 算法对测量信号进行处理, 最终可 以计算得到被测目标的厚度. 结果表明 ESPRIT 算法可以进一步提高激光测距系统的分辨率.

#### 参考文献

- Tan L Q, Hua D X, Wang L, Gao F, Di H G 2014 Acta Phys. Sin. 63 224205 (in Chinese) [谭林秋, 华灯鑫, 汪丽, 高飞, 狄慧 鸽 2014 物理学报 63 224205]
- [2] Yang L H 2010 Ph. D. Dissertation (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [杨凌辉 2010 博士学位论文 (天津: 天 津大学)]
- [3] Yang Z D, Wang P, Li X H, Sun C K 2014 Opt. Lasers Eng. 54 31
- [4] Gao F, Guo W Z, Song Q, Du F S 2010 Chin. J. Mech. Eng.
   46 92 (in Chinese) [高峰, 郭为忠, 宋清玉, 杜凤山 2010 机械工 程学报 46 92]
- [5] Wen X D, Ning T G, You H D, Kang Z X, Li J, Li C, Feng T, Yu S W, Jian W 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 034203
- [6] Liu T Y, Zhang F M, Wu H Z, Li J S, Shi Y Q, Qu X H 2016 Acta Phys. Sin. 66 020601 (in Chinese) [刘亭洋, 张福民, 吴翰 钟, 李建双, 石永强, 曲兴华 2016 物理学报 66 020601]
- [7] 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]

- [8]~ Shi G, Wang W, Zhang F M 2018Opt.~Commun.~411~152
- [9] Schneider R 2001 Opt. Eng. 40 33
- [10] Arseny V, Naresh S, Xu S B 2010 Appl. Opt. 49 1932
- [11] Yu X, Hong G L, Ling Y 2011 Acta Opt. Sin. **31** 0606002
- [12] Meng X S, Zhang F M, Qu X H 2015 Acta Phys. Sin. 64 230601 (in Chinese) [孟祥松, 张福民, 曲兴华 2015 物理学报 64 230601]
- [13] Xu S Z, Kooij B J, Yarovoy A 2019 Sig. Pro. 168 107259
- [14] Sébastien L F, Yves S, Rostand M, Patrick F 2008 Appl. Opt. 47 3027
- [15] John D, Ben H, Andrew J L, Andrew J L, Armin J H 2014 Opt. Express 22 24869
- [16] Mateo A B, Barber Z W 2015 Appl. Opt. 54 6019
- [17] Lippok N, Coen S, Nielsen P 2012 Opt. Express 20 23398
- [18] Jiang S, Liu B, Wang H C, Zhao B 2019 Sensors 19 5132
- [19] Pan H, Zhang F M, Shi C Z, Qu X H 2017 Appl. Opt. 56 6956
- [20] Deng Z W, Liu Z G, Gu S W, Jia X Y, Deng W, Yan H H 2020 Opt. Commun. 455 124556
- [21] Deng Z W, Liu Z G, Jia X Y, Deng W, Zhang X, Wang Z Y 2019 Appl. Opt. 58 6865
- [22] Liu G D, Xu X K, Liu B G, Chen F D, Hu T, Lu C, Gan Y
   2016 Acta Phys. Sin. 65 209501 (in Chinese) [刘国栋, 许新科,
   刘炳国, 陈凤东, 胡涛, 路程, 甘雨 2016 物理学报 65 209501]
- [23] Xu X K, Liu G D, Liu B G, Chen F D, Zhuang Z T, Gan Y
   2015 Acta Phys. Sin. 64 219501 (in Chinese) [许新科, 刘国栋,
   刘炳国, 陈凤东, 庄志涛, 甘雨 2015 物理学报 64 219501]
- [24] Zhang L H 2013 Ph. D. Dissertation (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [张立宏 2013 博士学位 论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [25] Xu X K 2017 Ph. D. Dissertation (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [许新科 2017 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]

# Laser frequency scanning interferometry based on estimating signal parameters via rotational invariance technique<sup>\*</sup>

Xu Jing-Xiang Kong Ming Xu Xin-Ke<sup>†</sup>

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)
(Received 16 July 2020; revised manuscript received 2 September 2020)

#### Abstract

The laser frequency scanning interferometry, as a non-contact method, has non-ranging blind zone and achieves multi-target testing in a single measurement. The beat frequency of target can be extracted by Fourier transform, and then the distance can be solved. However, due to the limitation of laser frequency modulation bandwidth, the resolution of target obtained by Fourier transform is limited to the inherent resolution. In order to solve this problem, in this paper we propose to use the estimating signal parameter via rotational invariance technique (ESPRIT) to perform spectrum analysis on the measured signal. In the experiment, the resampling method is adopted to correct the non-linearity of the measured signal beat frequency, and then the ESPRIT algorithm is used to obtain the target distance. The results show that the Fourier transform algorithm cannot distinguish the target signal from the frequencies of adjacent target, but the ESPRIT algorithm can do. The thickness of the measured target is 2.08 mm. This provides ideas for measuring, such as damage point in the proximity of the fiber, height of thin step, or small hole.

**Keywords:** laser frequency scanning interferometry, fast Fourier transform, estimating signal parameter via rotational invariance technique algorithm

**PACS:** 42.79.Qx, 95.75.Kk, 06.30.Bp, 42.60.-v

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201135

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LY19F050008).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xuxinke-123@163.com