

光学学报

非合作目标光频扫描干涉信号快速检测方法

赵晖, 吴腾飞*, 周强, 段志君

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 研究非合作目标光频扫描干涉信号的快速检测方法,采用稀疏傅里叶变换算法快速求解距离谱,通过引入综合 Rife 算法精密校正距离谱,可大幅提升解算效率,保证解算精度。实验结果表明,所设计的硬件检测单元能够高效采集并处理不同粗糙度、入射距离及入射角度的非合作目标干涉信号,2 MB 数据的处理时间为 0.1224 s,在 12 m 范围内测距误差小于 13 μm ,标准差优于 10 μm 。

关键词 测量; 光频扫描干涉; 非合作目标; 频谱校正; 绝对距离测量

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221500

1 引言

随着大型先进装备制造技术的高速发展,制造现场大尺寸测量场景对距离测量技术的环境适应性、效率和精度有着越来越高的需求^[1-2]。光频扫描干涉(FSI)绝对距离测量技术具有测量范围大、测量精度高、抗干扰能力强、非合作目标测量等优点,在当前高精度工业测量研究中受到了广泛关注^[3-5]。实际测量中,为保证不破坏待测物,同时提升测量效率,往往采取非合作目标的测量形式。实际测量现场工况复杂,非合作目标表面回光微弱,FSI 信号强度弱、信噪比低、数据量庞大,需要采用光学聚焦的方法^[6-8]提升信号质量,并采用合理的信号检测方法以满足测量现场精度、效率与适用性的要求。

根据非合作目标光频扫描干涉信号的特点,研究人员常用频谱解算干涉拍频,进而计算待测距离,但离散频谱受信号时域截断影响,其幅值、相位和频率存在较大误差,需进行频谱校正以提升精度。常用的高精度频谱校正算法包括相位差法^[9-10]、频谱细化法^[11-12]、幅度比值法^[13]。相位差法的频率校正精度高,但需要两段数据参与计算,计算量较大、效率较低。频谱细化法具有极高的频谱校正精度,目前绝大部分 FSI 测距系统采用频谱细化法,如 Xu 等^[14]采用细化快速傅里叶变换(ZFFT)-线性调频 Z 变换(CZT)算法实现 FSI 重采样信号细化谱的快速获取,该方法在数据量大且需要高细化倍数的情况下效果较好,但仅运用在合作目标测量数据处理方面。Lu 等^[15]采用快速啁啾分解算法进行频率估计,该算法在保证高精度距离解算结果

的同时加快信号处理速度,但处理时间仍需 1~2 s。熊星庭^[16]采用能量中心法-CZT 算法对 FFT 信号频谱进行分段处理,在保证抗干扰能力的前提下兼顾了频率提取精度,信号处理时间小于 1 s。目前采用频谱细化方法对 FSI 干涉信号进行频谱校正的问题是效率较低,难以满足制造现场需求。幅度比值法常见的有 Rife 算法^[17]以及 Quinn 算法^[18]等,这类方法的校正精度能达到原频谱细化 100 倍以上的效果,在相同校正精度下计算量远小于其他几类算法,常运用于调频连续波雷达测距数据处理等领域^[19-20],能够很好地适应各种测量目标与测量条件,在保证测量效率的前提下可以有效替代频谱细化方法。

本文研究非合作目标 FSI 信号的快速采集与实时距离解算方法,分析 FSI 绝对测距原理与非合作目标 FSI 信号特征,采用稀疏傅里叶变换算法快速求解距离谱,引入综合 Rife 算法精密校正距离谱,在现场可编程门阵列(FPGA)-数字信号处理(DSP)平台进行 FSI 信号快速频谱分析和频谱校正,高精度实时解算待测距离,进行大尺度绝对距离测量实验以验证本文方法的适用性、时效性以及准确性。

2 测量原理

非合作目标 FSI 测距系统的示意图如图 1 所示,该系统包含测量干涉光路和辅助干涉光路,其中测量干涉光路用于产生非合作目标 FSI 信号,辅助干涉光路的光程差恒定,用于产生辅助干涉信号,对测量干涉信号进行重采样以消除激光器的光频扫描非线性的影响。两路干涉信号由光电探测器(PD)转换为电信号

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-09-19; 录用日期: 2022-10-21; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(52127810, 51721003)

通信作者: *wtf@tju.edu.cn

并进入信号检测系统,经过光频扫描非线性校正^[21]、频谱估计与频谱校正等处理后,解算干涉信号,得到待测

距离。

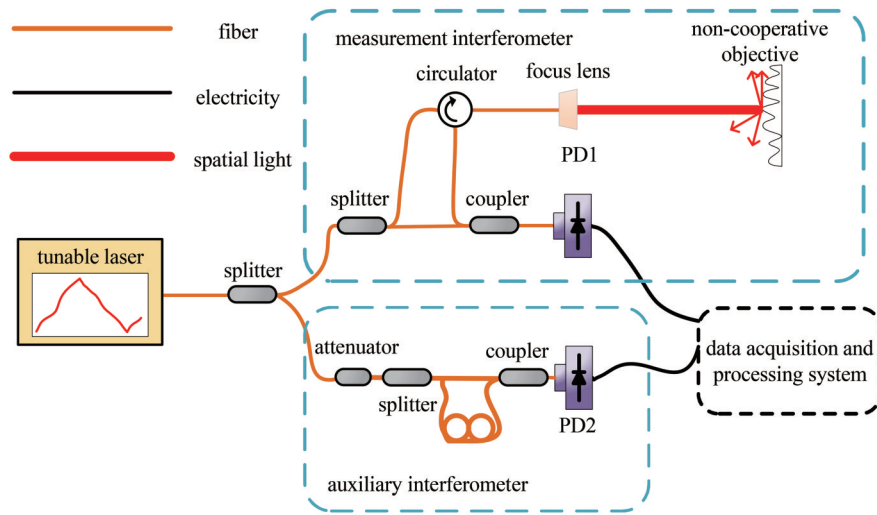


图 1 非合作目标 FSI 测距系统示意图

Fig. 1 Diagram of FSI ranging system for non-cooperative target

当激光器的频率调谐速度 α_0 恒定时,干涉信号为单频信号,待测距离 L 与干涉信号的拍频 f 密切相关,可以表示为

$$L = \frac{cf}{2n_a\alpha_0}, \quad (1)$$

式中: n_a 为空气折射率; c 为真空中光速。可以看到,距离解算精度取决于拍频提取精度,但是提升拍频提取精度不可避免地要增加采样数据量,这会导致采集与后续频谱解算的时间增加。

对于非合作目标,测量光在其表面发生漫反射后,环形器的光功率会受到非合作目标表面散射特性的影响。测量干涉信号交流分量的功率可以表示为

$$\tilde{P} = \eta \sqrt{\frac{GI\sigma A}{(4\pi l^2)^2}} A_r, \quad (2)$$

式中: η 表示 PD 的转换效率; G 为与传输损失、光学收发系统效率和光耦合效率等相关的衰减因子; I 表示入射光的功率; A 表示信号收发系统的有效面积; l 表示空间传输距离; A_r 表示测量干涉光路中的参考光振幅; σ 表示后向散射系数,对于高斯分布的粗糙表面,在入射光波长大于表面高度起伏均方根 δ 且表面均方根斜率小于 0.3 的情况下, $\sigma^{[22]}$ 可以表示为

$$\sigma = 2\sqrt{\pi} k_p^4 \delta^2 l_r \cos^4 \theta_i |\alpha_{pq}|^2 \exp\left(\frac{-k_p^2 l_r^2 \sin^2 \theta_i}{4}\right), \quad (3)$$

式中: k_p 表示波数; l_r 表示粗糙表面的相关长度; θ_i 表示入射角; α_{pq} 表示极化系数。由式(3)可以看出,后向散射系数的理论值大小与非合作目标表面粗糙度与测量光入射角度负相关。

在这种条件下,参考光功率 P_r 远大于回波测量的功率,参考光产生的散粒噪声为测量干涉信号中的

主要噪声^[23],其等效功率为

$$P_e = P_r/B, \quad (4)$$

式中: B 表示可调谐激光器的扫描带宽。测量干涉信号的信噪比可以表示为

$$R_{SN} = 10\lg\left(\frac{\tilde{P}}{P_r} B\right). \quad (5)$$

在实际测量中,非合作目标 FSI 信号受到漫反射回光的影响明显减小,相较于合作目标 230 μW 左右的稳定回光功率和 20 dB 左右的信噪比,非合作目标整体的回光功率最大仅为 40 μW ,信噪比小于 10 dB,这使得光纤端面反射引入的干扰干涉信号以及噪声等因素对测量结果的影响更加明显。随着粗糙度、空间距离、入射角度的增大,非合作目标 FSI 信号强度与信噪比均呈降低的趋势,这与利用式(2)、(5)预测的结果一致。

通过上述分析不难看出,非合作目标 FSI 测量可以实现对不同粗糙度表面以及不同入射角度下的距离测量,这使得测量过程具有很大的灵活性,能够实现在线测量。但是测量信号强度以及信噪比受表面粗糙度、入射距离以及入射角度等因素的影响较大,这就要求信号检测单元能够适配不同条件下的干涉信号,同时具有良好的抗噪声性能,并能兼顾准确性与时效性,实现对非合作目标 FSI 信号的有效提取与快速准确的解算。

3 信号快速检测方法

从非合作目标 FSI 信号的特点出发,本文设计了一种基于频谱法的高精度快速距离解算单元,整体算法流程如图 2 所示。两路干涉信号经过高速数据采集后进入数据处理单元,通过前置滤波后用辅助干涉信号对测量干涉信号进行重采样以消除激光器的频率扫

描非线性导致的频谱展宽^[24]。为保证频谱解算精度,重采样后的数据量约有 2×10^6 点,结合第 2 节对信号特征的分析,使用稀疏傅里叶变换(SFT)算法^[25-26]替代 FFT 算法,可在保证目标位置频谱解算效果的同时缩短运行时间。离散频谱受到栅栏效应的影响,需要使用频谱校正算法以获得拍频的最佳估计值。本单元设计时兼顾校正精度与运行时间,因此选取幅度比值法中的综合 Rife 算法^[27],这种算法的计算速度快、校正精度高、抗噪声能力强,能够很好地适应各种测量目标与测量条件。

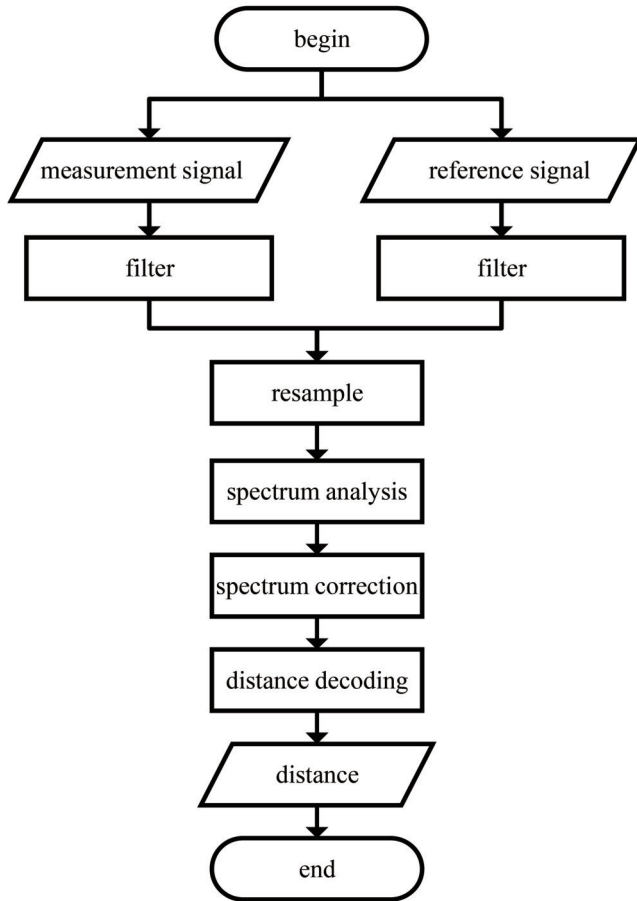


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing process

可调谐激光器受本身性能限制及环境扰动影响,光频不可能绝对呈线性变化,必然存在频率波动,对应的干涉信号也不再是标准正弦信号,而是受到一定的频率调制,此时测量干涉信号 $I(t)$ 和辅助干涉信号 $I_{\text{ref}}(t)$ ^[28] 可以分别表示为

$$\begin{cases} I(t) = \tilde{I} \cos \left[2\pi\tau \left(\alpha_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i t^i \right) + \varphi \right] \\ I_{\text{ref}}(t) = \tilde{I}_{\text{ref}} \cos \left[2\pi\tau_{\text{ref}} \left(\alpha_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i t^i \right) + \varphi_{\text{ref}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: \tilde{I} 、 \tilde{I}_{ref} 分别表示测量干涉信号和辅助干涉信号交流信号部分的强度; α_i 表示调频非线性系数, i 为正整

数; α_0 为激光器设置的频率调谐速度; t 为扫描时间; τ 、 τ_{ref} 分别表示两路干涉光路中测量光相对于参考光引入的时延; φ 、 φ_{ref} 为常数相位。此时,利用频谱解算方法计算待测距离时频谱会展宽,将严重影响测量精度。对此,可利用辅助干涉信号的过零点对测量干涉信号进行重采样,以消除激光器扫描非线性的影响,新的采样位置为

$$v(n) = \alpha_0 t + \sum_{i=2}^{\infty} \alpha_i t^i = \frac{2n\pi + \pi - 2\varphi_{\text{ref}}}{4\pi\tau_{\text{ref}}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

式中: n 、 N 分别为重采样点序数和重采样点数。

在实际光路设计中,为使重采样过程满足奈奎斯特采样定理,应保证辅助干涉光路的两臂光程差远大于测量干涉光路 ($\tau_{\text{ref}} > 10\tau$ 且 τ_{ref} 已知),重采样后的干涉信号可以表示为

$$I(n) = \tilde{I} \cos \left(2\pi \frac{n_a L}{R} n + \varphi_a \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

式中: φ_a 为常数相位; R 表示辅助干涉光路等效空间距离(真空),上述过程实现了对测量干涉信号的等频率间隔采样。重采样后的信号解算得到的拍频 f_{beat} 表示 τ 、 τ_{ref} 的比值,为无量纲数,进而式(1)可以改写为

$$L = \frac{R f_{\text{beat}}}{n_a}. \quad (9)$$

为了求解距离,需要先求解拍频,信号 $I(n)$ 作为待处理时域信号,通过 SFT 算法进行频谱解算。如图 3 所示, SFT 算法可以分为分筐与频谱重构两个部分,分筐操作的基本思想就是通过散列法将信号频谱中的 N 个傅里叶系数通过规则 Γ 散列到 P 个“筐”中,每个“筐”对应的值是其内所有傅里叶系数的和。由于信号的频谱中有效频点数极少,仅有少数“筐”中含有原频谱中的大值点。针对这些含有大值点的“筐”,通过对应的频谱重构算法 Γ^{-1} 反映射计算出信号频域中有效大值频点的位置并估计其值,这样便得到了仅含有算法设置的 k (称为稀疏度) 个不为零的频点的频谱,并经过多次迭代保证求得频点的准确性,这样就实现了目标频谱的求解过程,得到了频谱 $Y(k)$ 。

由式(9)可知,距离分辨率取决于频率分辨率,测距分辨率可以表示为

$$\delta_L = \frac{R}{n_a} \Delta f_{\text{beat}} = \frac{R}{n_a} \frac{1}{N}, \quad (10)$$

式中: Δf_{beat} 表示频率分辨率。

采用 SFT 算法得到了离散的频率值,频率分辨率限制了频率估计精度,在给定的采样点数下,分辨率无法达到要求,所以需要通过对 s-Rife 算法对频谱进行插值细化以提升距离解算分辨率,其基本流程如图 4 所示。

s-Rife 算法在原频谱最大频谱值为 $|Y(k_0)|$ 的基础上求取 $|Y(k_0 + 0.5)|$ 和 $|Y(k_0 - 0.5)|$ 两条细化谱线,并利用这两条谱线判断插值方向与插值方法,估计实际最大谱线位置,图 4 中提到的插值公式为

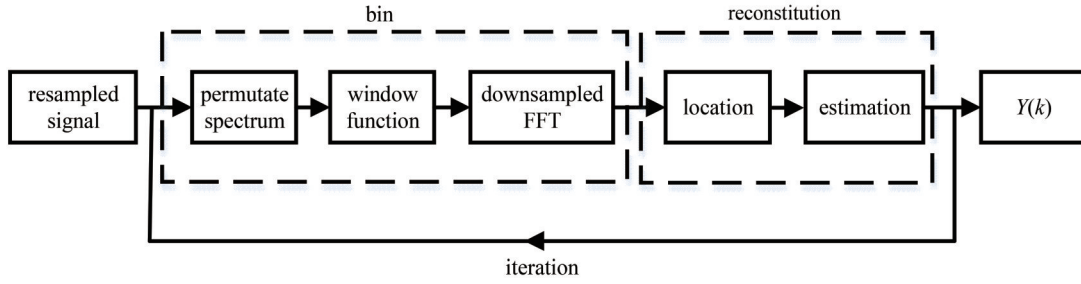


图 3 使用 SFT 算法提取目标位置频谱的流程图

Fig. 3 Flow chart of extracting target position spectrum using SFT algorithm

$$f_0 = \begin{cases} \frac{1}{T} \left[k_0 + r \frac{|Y(k_0 + r)|}{|Y(k_0)| + |Y(k_0 + r)|} \right] & T_r \text{ is smaller than threshold} \\ \frac{1}{T} \left[k_0 + r \frac{||Y(k_0 + 0.5)| - |Y(k_0 - 0.5)||}{|Y(k_0 + 0.5)| + |Y(k_0)| + |Y(k_0 - 0.5)|} \right] & T_r \text{ is not smaller than threshold} \end{cases}, \quad (11)$$

式中： T 为扫描周期； r 为运算系数； f_0 为校正后的待测频率值。当 $|Y(k_0 + 0.5)| \geq |Y(k_0 - 0.5)|$ 时， r 取 1，反之取 -1。得到的 f_0 为拍频的估计值，将已预先精确标定

的辅助干涉光路等效空间距离代入式(9)，即可求得最终距离。

4 实验与分析

为验证本文提出的非合作目标FSI距离解算方法的时效性、准确性与适用性，搭建了如图5所示的实验装置。其中测量干涉光路中测量臂与参考臂光纤部分的等效空间距离差约为 5.7 m，以两臂等长处为距离零点，后续提到的距离均为相对于这一位置的距离。测量臂测量光束经可聚焦镜头(C80APC-A, Thorlabs)聚焦出射到待测非合作目标(表面粗糙度 R_a 分别为 0.1、0.8、1.6、6.3 的 4 种样块)。漫反射后回光，非合作目标与激光干涉仪(XL-80, Renishaw, 测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$)背对安装于线性导轨(86BYG250B, 北京北光世纪仪器有限公司)上，调整两光束与导轨运动方向同轴且准直以尽可能减小阿贝误差和余弦误差的干扰。辅助干涉光路为光纤马赫-曾德尔干涉仪，测量臂与参考臂的等效空间光程差约为 161.440405 m(真空)，测量干涉光路和辅助干涉光路的干涉信号分别由 PD1 和 PD2(PDB470C, Thorlabs)转化为电信号后，由信号检测系统采集并使用本文提出的频谱分析方法进行距离解算，测量结果通过串口传送至计算机(PC)界面显示。

实验中设置可调谐激光器(81606A, Keysight, 线宽小于 10 kHz)的波长调制范围为 1530~1545 nm(对应的扫描带宽约为 1.9 THz)，调制速度为 20 nm/s。根据式(7)的分析，系统距离测量范围约为 16 m，信号检测系统首先通过模拟数字转换器(AD9613, ADI)在 FPGA(XC7K325T-2FFG676I, Xilinx)端以 10 MHz 的采样率进行两路干涉信号的采集，单次采集总数据量约为 1.6×10^7 点，利用辅助干涉信号对测量干涉信号进行重采样后的数据(辅助干涉光路拍频约为

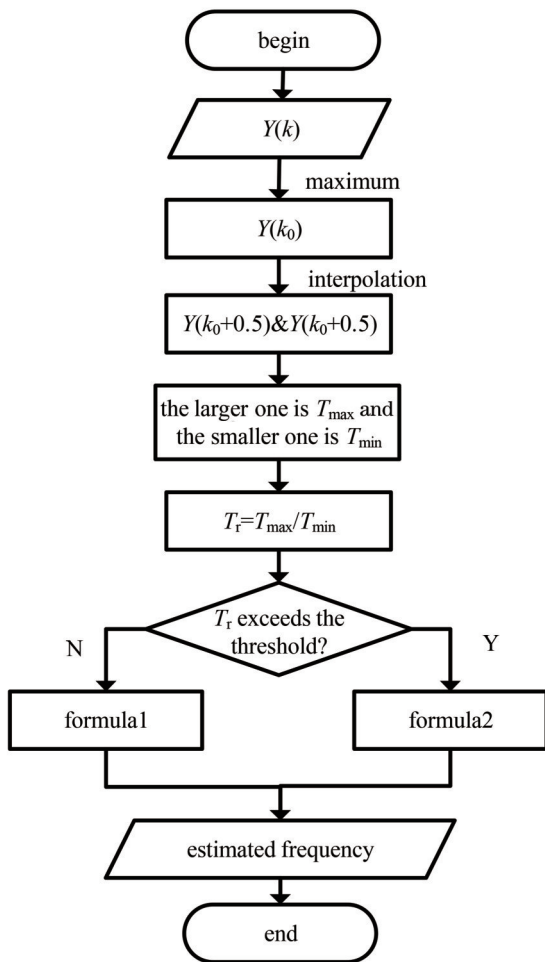


图 4 s-Rife 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of s-Rife algorithm

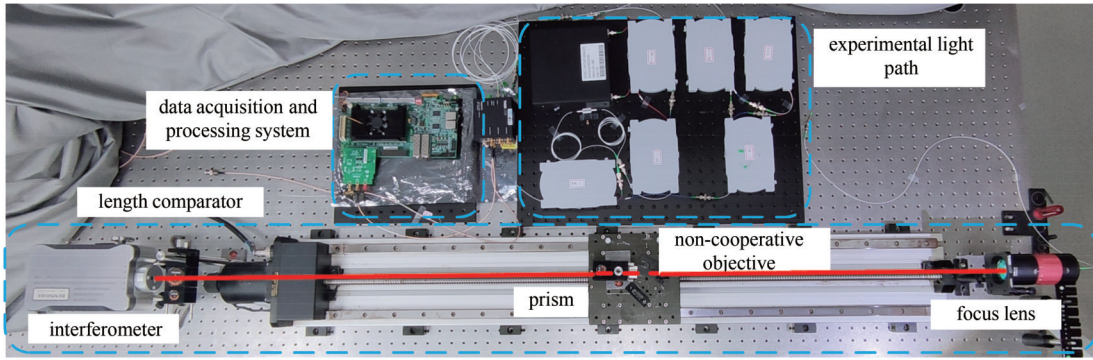


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental device

2.5 MHz, 对应的重采样数据量约为 2×10^6 点, 数据类型为单精度浮点数)通过串行高速输入输出(SRIO)模块的 AXI4-Stream 接口由 AXI4 总线传输到 DSP (TMS320C6678, TI) 的 DDR3 中, 在 DSP 端通过 SFT+s-Rife 算法对信号进行处理, 求解实际距离。所有非合作目标以 6.4 m 左右为初始位置, 以 100 mm 的步长向远离聚焦镜头方向步进 4 次并在初始位置以 5° 的步长沿顺时针方向步进 6 次, 在每个位置重复测量 20 次。其中表面粗糙度为 0.1 的非合作目标分别从 6.4 m 和 11 m 左右的位置开始, 以 100 mm 的步长向

远离聚焦镜头方向步进 8 次, 在每个位置重复测量 20 次, 并与干涉仪对比相对精度。

为了验证本文频谱解算与频谱校正算法的准确性与时效性, 对实验数据进行分析, 分别使用 SFT 和 FFT 算法对比频谱解算效果, 如图 6 所示, 设置 SFT 稀疏度 k 为 200, 可以看到: 在目标距离处 SFT 算法能够得到与 FFT 算法相同的频谱峰值, 二者在这部分的偏差可以忽略不计。SFT 算法仅解算 k 个非零频点, 幅值较小的频点以及噪声引入的杂散幅值等非必要信息可忽略, 所以 SFT 算法的计算时间远小于 FFT 算法。

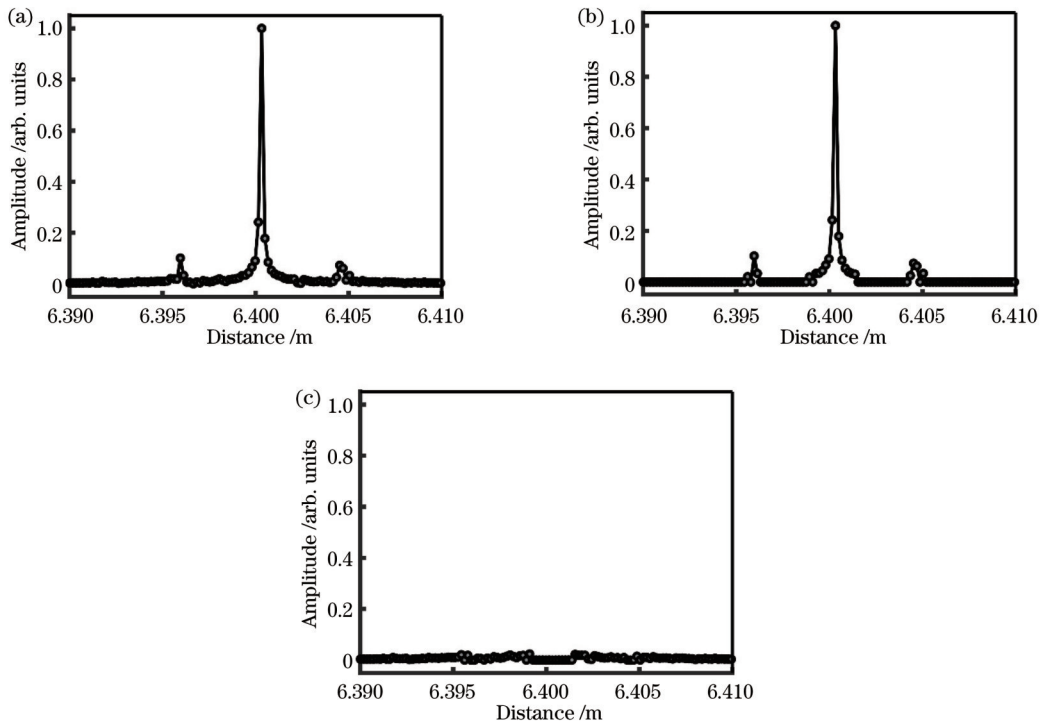


图 6 SFT 与 FFT 频谱解算结果对比。(a)待测距离处 FFT 频谱;(b)待测距离处 SFT 频谱;(c)两种算法的频谱解算偏差

Fig. 6 Comparison of spectral solutions between SFT and FFT. (a) FFT spectrum at distance to be measured; (b) SFT spectrum at distance to be measured; (c) spectrum solution deviation of two algorithms

对于频谱校正算法效果的验证, 选用 s-Rife 算法、CZT 算法和 ZFFT 算法分别对频谱待测位置的峰值进行插值(频谱细化算法细化 200 倍, 细化后距离分辨

率约为 $0.2 \mu\text{m}$)后得到的频谱图如图 7 所示。对比结果可以发现, 三种算法插值后得到的目标位置频谱包络基本重合, 对所有实验数据进行频谱插值算法对比,

s-Rife 算法与其他两种算法的峰值定位偏差在 $0.6 \mu\text{m}$ 之内, 能够满足测量需求。

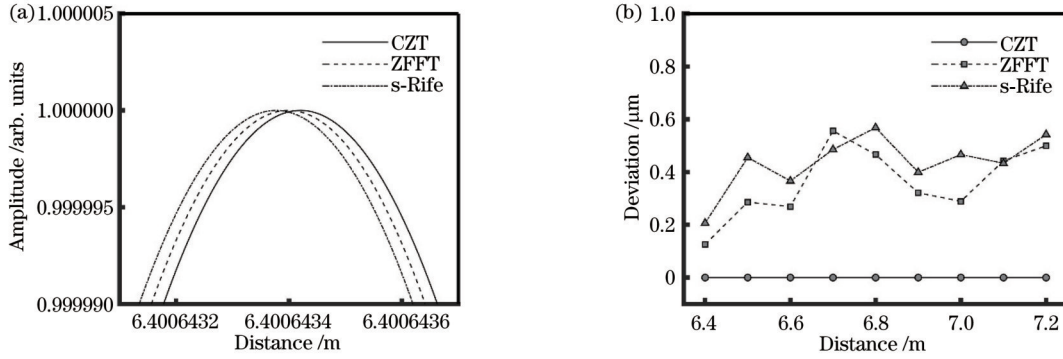


图 7 s-Rife、CZT 和 ZFFT 频谱校正效果对比。(a) 目标位置校正后的频谱; (b) 不同距离校正结果偏差 (以 CZT 算法为基准)
Fig. 7 Comparison of spectrum correction effects of s-Rife, CZT, and ZFFT. (a) Spectrum corrected at target position; (b) deviation of calibration results at different distances (based on CZT algorithm)

所有测量数据的平均处理时间如表 1 所示。PC 端频率为 3 GHz, DSP 端频率为 1 GHz。可以看出, 本文使用的 SFST+s-Rife 算法不论是每一部分还是总

体在计算效率上相对常用的 FFT+CZT/ZFFT 算法均有显著提升, 即使在片上系统中仍能实现 ms 级的解算过程, 满足在线实时快速测量的需求。

表 1 各算法的运行时间

Table 1 Running time of different algorithms

unit: s

Algorithm	Spectrum calculation time	Algorithm	Spectrum correction time	Total time
FFT(PC)	0.2186	CZT(PC)	2.6357	2.8543
SFT(PC)	0.0347	ZFFT(PC)	1.2259	1.4445
SFT(DSP)	0.0802	s-Rife(PC)	0.0205	0.0552
		s-Rife(DSP)	0.0422	0.1224

为了验证本文设计的距离解算方法的适用性, 分别对比各非合作目标在不同距离与不同角度的测量结果标准差, 其结果如图 8 所示。如第 2 节所述, 散粒噪声引入的长度测量误差 E_L 可以表示为

$$E_L = \frac{\delta_L}{R_{SN}} = \frac{R}{n_a N \cdot R_{SN}} \quad (12)$$

以信噪比为 10 dB 为例, 散粒噪声引入的测量误

差约为 $7.88 \mu\text{m}$ 。从图 8 中可以看出, 随着粗糙度、空间距离、入射角的增大, 测量结果标准差呈增大趋势, 一些反常点可能是受到振动等因素造成的多普勒效应的影响, 结果基本与式 (12) 的分析结果一致, 测量结果的标准差在实验条件下总体小于 $10 \mu\text{m}$, 在误差允许范围内, 因此该方法能够对各种条件下的各类非合作目标进行测量, 具有较为广泛的适用性。

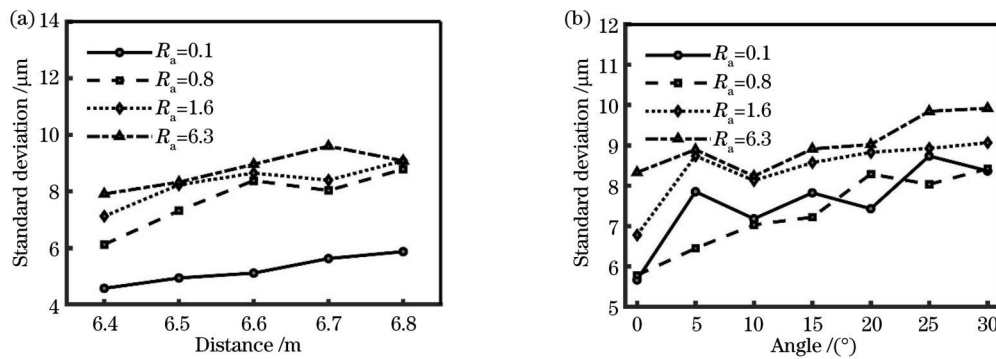


图 8 不同非合作目标改变距离与入射角度后测量结果的标准差对比。(a) 改变距离 (正入射); (b) 改变角度 (距离 6.4 m)
Fig. 8 Comparison of standard deviations of measurement results when distance and incident angle of different non-cooperative targets are changed. (a) Change of distance (normal incidence); (b) change of angle (distance is 6.4 m)

为了比较本文设计系统的距离测量的准确性与稳定性, 针对表面粗糙度为 0.1 的样块的 18 个位置得到的绝对距离测量结果标准差以及不同位置相对于初始

位置的位移增量误差 (相比于商用干涉仪) 如图 9 所示。从图中可以看出: 随着空间距离的增大, 测量结果标准差及其与商用干涉仪结果的误差呈增大趋势, 这

与测量距离增加导致的回光强度减弱、信噪比降低以及噪声干扰增大有关,这一结果较式(12)的推导结果略大,主要是因为测量结果还受到测量系统的阿贝误差、余弦误差、待测目标振动以及色散等因素的影响,

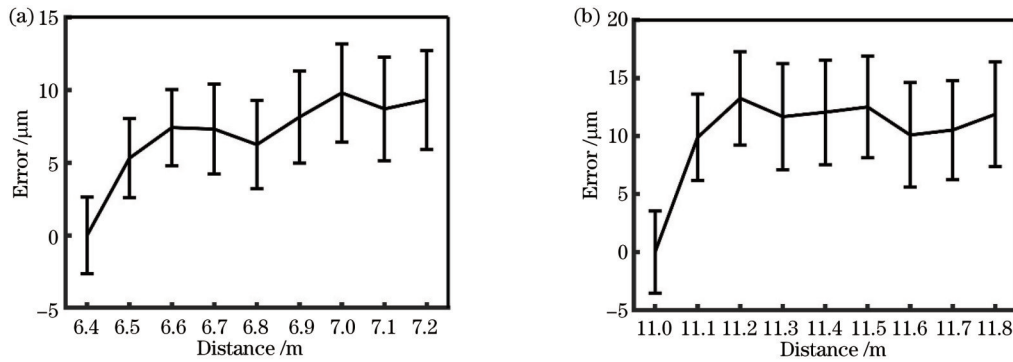


图9 测距结果对比。(a)距离范围为6.4~7.2 m;(b)距离范围为11~11.8 m

Fig. 9 Comparison of ranging results. (a) Distance range is 6.4~7.2 m; (b) distance range is 11~11.8 m

5 结 论

研究非合作目标FSI信号快速采集与距离解算方法,分析了非合作目标FSI信号的时频特征,利用SFT算法对重采样后的干涉信号进行频谱分析,并采用s-Rife算法进行频谱插值,在FPGA-DSP平台实现并验证上述方法,实现了待测距离的高精度快速解算。实验结果表明,所设计的硬件检测单元能够对各种粗糙度的非合作目标FSI信号进行有效采集与处理;相比于经典的FFT+CZT方法,本文方法的距离解算时间从2.8543 s缩短至0.1224 s;本文方法在12 m范围内的测量结果与商用干涉仪测量结果的误差小于13 μm,测距结果标准差优于10 μm。本文方法具有良好的适用性、时效性以及准确性,能够满足工业现场大尺寸绝对距离测量需求。

参 考 文 献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] Montavon B, Peterek M, Schmitt R H. Model-based interfacing of large-scale metrology instruments[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11059: 110590C.
- [3] 吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 等. 光频扫描干涉绝对距离测量[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918002.
Wu T F, Zhou Q, Lin J R, et al. Frequency scanning interferometry absolute distance measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918002.
- [4] Deng Z W, Liu Z G, Jia X Y, et al. Dynamic cascade-model-based frequency-scanning interferometry for real-time and rapid absolute optical ranging[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21929-21945.
- [5] 李小路, 周依尔, 毕腾飞, 等. 轻量型感知激光雷达关键技术发展综述[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1910002.
Li X L, Zhou Y E, Bi T F, et al. Review on key technologies of lightweight type-aware LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1910002.
- [6] 姚艳南. 调频连续波激光测距信号处理算法研究及其聚焦系统设计[D]. 天津: 天津大学, 2017.
Yao Y N. Study on the signal processing algorithms of frequency modulated continuous wave laser ranging system and its autofocusing system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [7] 张广进, 吴侃, 李超, 等. 透镜辅助的集成收发调频连续波激光雷达[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0623001.
Zhang G J, Wu K, Li C, et al. Lens-assisted frequency modulated continuous wave lidar based on integrated transceiver[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0623001.
- [8] 裴冰, 张福民, 曲兴华, 等. 无合作目标测距的回波接收系统设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 198-205.
Pei B, Zhang F M, Qu X H, et al. Design and analysis of echo receiving system in non-cooperative target ranging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 198-205.
- [9] Kang D, Ming X, Xiaofei Z. Phase difference correction method for phase and frequency in spectral analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(5): 835-843.
- [10] 侯庆文, 陈先中, 王小攀, 等. 改进的FMCW信号加权补偿校正相位差法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 721-726.
Hou Q W, Chen X Z, Wang X P, et al. Improved phase-difference algorithm with weighted compensation and correction for FMCW signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 721-726.
- [11] Ma S H, Ma Q S, Liu X B. Applications of chirp z transform and multiple modulation zoom spectrum to pulse phase thermography inspection[J]. NDT & E International, 2013, 54: 1-8.
- [12] 陈星. 线性调频激光测距算法研究及DSP实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
Chen X. Research and implementation of linear frequency modulation laser ranging algorithms based on DSP[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [13] 齐国清. 离散实正弦信号参数估计的Cramer Rao方差下限[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(2): 151-155.
Qi G Q. Cramer Rao bounds of real sinusoid parameter estimation from discrete-time observations[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(2): 151-155.
- [14] Xu X K, Liu G D, Chen F D, et al. Research on a kind of high precision and fast signal processing algorithm for FM/CW laser radar[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 92970D.
- [15] Lu C, Liu G D, Liu B G, et al. Absolute distance measurement system with micron-grade measurement uncertainty and 24 m range using frequency scanning interferometry with compensation of environmental vibration[J]. Optics Express,

- 2016, 24(26): 30215-30224.
- [16] 熊星庭. 提高调频连续波激光测距系统测量精度和速度的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- Xiong X T. Research on improving the measurement accuracy and speed of the FMCW laser ranging system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [17] Rife D, Boorstyn R. Single tone parameter estimation from discrete-time observations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(5): 591-598.
- [18] 刘银恩. 高精度频率估计算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- Liu Y E. Research on high-precision frequency estimation algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [19] 张海燕, 汪润, 万健中. 基于 IRife 算法的高精度 LFMCW 雷达测距方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 251-256.
- Zhang H Y, Wang R, Wan J Z. LFMCW radar ranging method with high precision based on IRife algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2): 251-256.
- [20] 孙峰, 朱莉, 张超, 等. 毫米波 LFMCW 雷达测距关键算法研究[J]. 微波学报, 2015, 31(S2): 197-202.
- Sun F, Zhu L, Zhang C, et al. The key ranging algorithm for millimeter wave LFMCW radar[J]. Journal of Microwaves, 2015, 31(S2): 197-202.
- [21] Yüksel K, Wuilpart M, Megret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [22] 陶会荣. 无合作目标激光测距中目标特性对测量影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- Tao H R. Effect of target properties on the non-cooperative laser ranging system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [23] Baumann E, Deschênes J D, Giorgetta F R, et al. Speckle phase noise in coherent laser ranging: fundamental precision limitations[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4776-4779.
- [24] Sivanathan S, Roula M A, Copner N J, et al. Development of a hardware for frequency scanning interferometry for long range measurement[C]//2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 16-19, 2022, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2022.
- [25] Hassanieh H, Indyk P, Katabi D, et al. Simple and practical algorithm for sparse Fourier transform[C]//Proceedings of the Twenty-Third Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, January 17-19, 2012, Kyoto, Japan. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2012: 1183-1194.
- [26] 王文超. 稀疏快速傅里叶变换的应用方法研究[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2018.
- Wang W C. Study of the application sparse fast Fourier transform[D]. Beijing: Chinese Academy of Surveying & Mapping, 2018.
- [27] 王宏伟, 赵国庆, 齐飞林. 一种实时精确的正弦波频率估计算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 208-211.
- Wang H W, Zhao G Q, Qi F L. Real-time and accurate single frequency estimation approach[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(2): 208-211.
- [28] 张桐, 曲兴华, 张福民. 基于外部时钟信号触发重采样的激光频率调制测距方法[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0428003.
- Zhang T, Qu X H, Zhang F M. Laser frequency modulated ranging method based on triggering resample from outside clock signal[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0428003.

Fast Detection Method for Frequency Scanning Interference Signals of Non-Cooperative Targets

Zhao Hui, Wu Tengfei*, Zhou Qiang, Duan Zhijun

National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Objective The large-scale equipment manufacturing represented by aircraft and ships continues to promote digitalization and gradually develops toward intelligence, which leads to a sharp increase in the geometric measurement missions on the manufacturing site and a more complex and changeable on-site environment. Therefore, measurement must take into account adaptability, efficiency, and accuracy. Frequency scanning interferometry (FSI) ranging technology can be applied to non-cooperative targets to tackle the low measurement efficiency problem in the manufacturing field. However, it also confronts some problems, such as weak interference signal strength, low signal-to-noise ratio (SNR), and a large amount of data. According to the characteristics of FSI signals of non-cooperative targets, the distance to be measured is usually calculated with the interference beat frequency resolved through the spectrum. However, the discrete spectrum is affected by signal truncation in the time domain, and its amplitude, phase, and frequency are subject to large errors. Hence, spectrum correction is required for higher accuracy. The existing signal processing methods are based on the fast Fourier transform (FFT) + spectrum thinning algorithm, which are inefficient and difficult to meet the requirements of manufacturing sites. Therefore, according to the characteristics of FSI signals of non-cooperative targets, this paper uses the sparse Fourier transform (SFT) algorithm to quickly solve the range spectrum and introduces the synthesized Rife (s-Rife) algorithm to precisely correct the range spectrum, which greatly improves the understanding efficiency while considering the accuracy of range calculation.

Methods In this paper, a mathematical model is built to study the basic principle of FSI and the influence of the surface roughness, spatial distance, and incident angle of non-cooperative targets on FSI signal strength and SNR. A fast detection method for FSI signals of non-cooperative targets is proposed to overcome the shortcomings of existing processing methods in accuracy, efficiency, and adaptability. This method includes two processes: spectrum estimation and spectrum correction. For massive signal data (2×10^6 points) after the correction of the nonlinearity of optical frequency scanning by resampling, the SFT algorithm is used instead of the fast Fourier transform (FFT) algorithm to ensure the effectiveness of the spectrum solution at the target position and shorten the running time. To correct the discrete spectrum affected by time-domain truncation, this paper selects the s-Rife algorithm to obtain the best estimation of the beat frequency. This algorithm has fast calculation speed, high correction accuracy, and strong anti-noise ability, and can adapt well to various measurement targets and measurement conditions. Finally, the whole algorithm is deployed on the field-programmable gate array-digital signal processor platform to achieve high-precision real-time calculation of the distance to be measured.

Results and Discussions To verify the adaptability, timeliness, and accuracy of the fast detection method for FSI signals of non-cooperative targets proposed in this paper, an experimental device to measure the FSI signals of non-cooperative targets is built (Fig. 5). Different algorithms are used for spectrum estimation and correction of the collected interference signals. The feasibility of the SFT algorithm and s-Rife algorithm is verified by comparison (Figs. 6 and 7). For adaptability, the solution results can be obtained when non-cooperative targets with different roughness are measured at different spatial distances and incident angles, and the standard deviation of measurement results is less than $10 \mu\text{m}$ (Fig. 8). For timeliness, the distance calculation time is shortened from 2.8543 s to 0.1224 s compared with the case of the classical FFT+CZT method (Table 1). For accuracy, the comparison error with the measurement results by the commercial interferometer within the range of 12 m is less than $13 \mu\text{m}$, and the standard deviation of measurement results is less than $10 \mu\text{m}$ (Fig. 9). The experimental results show that the design in this paper has good adaptability, timeliness, and accuracy and can meet the actual measurement needs.

Conclusions This paper studies the method to rapidly acquire and calculate the range of FSI signals of non-cooperative targets, analyzes the time-frequency characteristics of FSI signals of non-cooperative targets, estimates the frequency spectrum of the resampled interference signals using the SFT algorithm, and interpolates the frequency spectrum using the s-Rife algorithm. The above methods are implemented and verified on the FPGA-DSP platform, and it is proven that they can realize high-precision and fast calculation of the distance to be measured. The experimental results show the fast detection method designed in this paper can effectively collect and process the FSI signals of non-cooperative targets with various roughness. Compared with the results of the classical FFT+CZT method, the distance calculation time is optimized from 2.8543 s to 0.1224 s. The comparison error with the measurement results by the commercial interferometer is less than $13 \mu\text{m}$ within the range of 12 m, and the standard deviation of the measurement results is less than $10 \mu\text{m}$. This method has good adaptability, timeliness, and accuracy and can meet the needs of large absolute distance measurements in the industrial field.

Key words measurement; frequency scanning interferometry; non-cooperative targets; spectrum correction; absolute distance measurement