

1-3-2019

Bound Analysis of Signal Processing Method on Laser Doppler Velocity & Vibration Measurement

Peng Xiang

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

Liu Bo

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Bound Analysis of Signal Processing Method on Laser Doppler Velocity & Vibration Measurement

Abstract

Abstract: Laser Doppler measurement technology has attracted more and more attention and application in the field of high precision measurement. For different signal characteristics and processing methods, there are different constraints of the measurement, which would determine the measurement precision and accuracy. *Based on the principle of laser Doppler velocity & vibration measurement and from the perspective of digital signal processing, the constraints related to the sampling rate, data length and time interval are analyzed. The time-interval homogenization processing method of the second sampling data, and the effect on the measurement range of aliasing about reference light frequency and signal sampling frequency with heterodyne measurement method are also respectively studied.* Experimental results show that the algorithm can obtain accurate measurement results quickly and accurately in the inferred measurement range.

Keywords

Doppler effect, measurement resolution, data interval homogenization, frequency aliasing

Recommended Citation

Peng Xiang, Liu Bo. Bound Analysis of Signal Processing Method on Laser Doppler Velocity & Vibration Measurement[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1927-1934.

激光多普勒测速测振信号处理方法的约束解析

彭翔, 刘博

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 激光多普勒测量技术, 在现代高精度测量领域中越来越受到关注和应用。对于不同的信号特性和处理方法, 测量将受到不同的约束, 会决定测量结果的精细度和准确度。基于激光多普勒测速测振的原理和数字信号处理的理论角度, 根据信号的采样率、数据长度、时间间隔等各个输入状态形成的约束条件得到了重点分析。对二次数据采用时间间隔均匀化的处理方法, 以及外差测量方式下参考光频率与信号采样频率发生混叠时对测量范围的影响也得以逐一论证。经程序仿真和实验验证, 在算法推算出的测量范围内, 能够快速准确地获得高精度的测量结果。

关键词: 多普勒效应; 测量分辨率; 数据间隔均匀化; 频率混叠

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 05-1927-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805039

Bound Analysis of Signal Processing Method on Laser Doppler Velocity & Vibration Measurement

Peng Xiang, Liu Bo

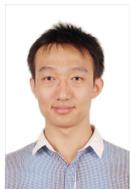
(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Laser Doppler measurement technology has attracted more and more attention and application in the field of high precision measurement. For different signal characteristics and processing methods, there are different constraints of the measurement, which would determine the measurement precision and accuracy. Based on the principle of laser Doppler velocity & vibration measurement and from the perspective of digital signal processing, the constrains related to the sampling rate, data length and time interval are analyzed. The time-interval homogenization processing method of the second sampling data, and the effect on the measurement range of aliasing about reference light frequency and signal sampling frequency with heterodyne measurement method are also respectively studied. Experimental results show that the algorithm can obtain accurate measurement results quickly and accurately in the inferred measurement range.

Keywords: Doppler effect; measurement resolution; data interval homogenization; frequency aliasing

引言

现代测量技术愈加要求对目标高精度、高效



收稿日期: 2016-06-23 修回日期: 2016-07-26;
基金项目: 国家 973 计划(2014CB744204), 国家自然科学基金(61501429), 中国科学院青年创新促进会资助项目(2016335);
作者简介: 彭翔(1988-), 男, 土家族, 硕士, 助理研究员, 研究方向为信号处理、高精度测量算法研究。

率、无损伤地进行测量, 这就决定了测量技术向非接触式测量的方向发展。其中, 激光测量技术是非接触测量中最重要的一种技术^[1-5], 具有接触式测量所无法达到的精确度和灵敏度而倍受青睐。

激光测量技术主要有: 散斑法、多普勒参考光测量法、莫尔条纹法、全息干涉法等^[6-7]。其中多普勒参考光测量法主要利用激光多普勒效应, 特别

<http://www.china-simulation.com>

• 1927 •

适合于特殊环境下的精细测量,从检测方式上可分为零差探测和外差探测两种^[8-13]。零差激光测量技术不需要对参考光进行移频处理,光学系统相对简单;而外差激光测量技术由于混合了参考光束,在本振光和信号光之间形成固定的频差,从而能够分辨出被测目标的运动方向。

1 激光多普勒测速测振原理

激光多普勒测量技术的基本原理为:相干的激光束照射物体表面,由于光波多普勒效应,被物体表面反射或散射回来的光发生了频移;当光的波长一定时,这种频移唯一地取决于反射面相对于观察者的运动速度。将测量光和参考光同时入射到光电探测器的光敏面上,形成干涉图样,光电探测器响应两光束的干涉光场而输出光电流。光电信号不仅与入射光强度有关,还与入射光频率和相位有关。反射光(或散射光)与参考光(本振光)干涉混频后,通过测量它们的光强变化,便可获得目标体的运动速度,以及进一步计算目标体的振动振幅、频率、速度等各个参数。

入射的本振光与信号光的光电场分别为:

$$E_1(t) = E_{10} \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_{20} \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

二者叠加时,所得光电流为:

$$\begin{aligned} I(t) = & \alpha \cdot (E_1 + E_2)^2 = (I_1 + I_2) + \\ & \alpha \cdot E_{10} E_{20} \cdot \cos[2\pi(f_1 + f_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] + \\ & \alpha \cdot E_{10} E_{20} \cdot \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \end{aligned} \quad (3)$$

由于光电探测器的响应速率有限,对于高频光信号,只能检测其一段时间内的平均值。式(3)中: $(I_1 + I_2)$ 为直流项; $(f_1 + f_2)$ 为上万 Hz 的高频项,探测器无法精确响应,其均值为零;即仅对信号光与本振光的差频项 $\Delta f = (f_1 - f_2)$ 产生有效响应。经直流滤波后,得到仅含有信号光与本振光混频后频移信息的信号电流,即目标体表面反射产生的多普勒效应,从而得到目标的瞬时径向速度 $V(t)$ 。根据多普勒频移原理,得到径向速度与频率对应关系为:

$$f_D = \Delta f = \frac{2V(t)}{c} f = \frac{2V(t)}{\lambda} \quad (4)$$

为减小光回波反馈效应和环境噪声的影响,提高信噪比和光能量利用率,本文的实验中采用了光纤环形器和平衡探测器。系统原理图如图 1 所示。

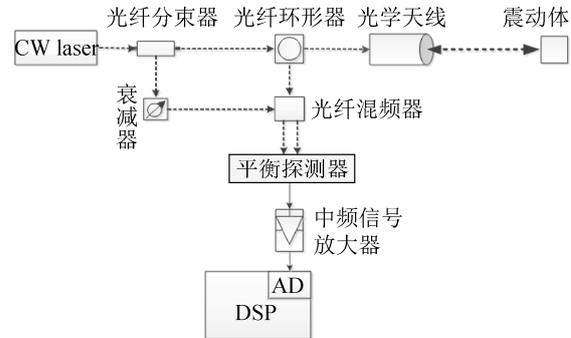


图 1 光纤型激光多普勒测振原理图

Fig. 1 Optical fiber laser Doppler vibrometer schematic

从图 1 中可看出,连续波激光器发出一束窄线宽的激光,经过分束镜分为两束,一束作为本振光,经过衰减器输入至光纤混频器;另外一束发射光束先后经过光纤环形器、光学天线后射向被测物体。被测物体漫反射信号光利用光学天线进行收集,然后经过光学环形器到达光学混频器。本振光和反射信号光经过光学混频器后输入至平衡式探测器,其输出的中频电信号经过放大器后进入一块带有 AD 功能模块的 DSP 芯片中进行 FFT 分析,即可得到被测物体的多普勒频移信息。

平衡探测器由一对光电响应特性基本相同的光电二极管加 TIA(跨阻放大器)组成。光电二极管把输入的光信号转换为电流信号,经过跨阻放大器转换为与两个光电二极管的输出电流之差成正比的电压,再经过功放输出给系统后面的信号处理单元。其组成如图 2 所示。

信号光与本振光经过保偏光纤耦合器后相位发生翻转,耦合器输出分别为:

$$\begin{aligned} i_1(t) = & \alpha \cdot (E_1 + E_2)^2 = \\ & I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \varphi) + I_{\text{noise}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_2(t) = & \alpha \cdot (E_1 - E_2)^2 = \\ & I_1 + I_2 - \sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \varphi) + I_{\text{noise}} \end{aligned} \quad (6)$$

输出电流为:

$$i(t) = i_1(t) - i_2(t) = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\varphi) + I'_{noise} \quad (7)$$

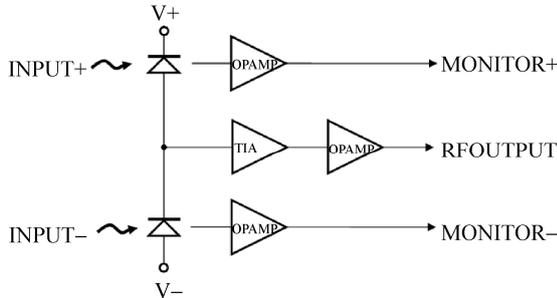


图 2 平衡探测器结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of balanced detector

由图 2 和公式(7)可以看出, 平衡探测器的输出主要与本振光与信号光的差频项(多普勒频移)以及相位差(光程差)有关, 本振光和信号光产生的直流信号能够被有效抑制, 而随机噪声也能得到抑制但并非完全消除, 毕竟噪声的随机性较大且在耦合器两端未必同步。

对于速度不断变化的周期性振动目标, 探测器输出的瞬时电流信号为:

$$i(t) = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi\int_0^t \Delta f_D dt + \Delta\varphi\right) + I'_{noise} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(2\pi\int_0^t \frac{2fV(t)}{c} dt + \Delta\varphi\right) + I'_{noise} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot s(t) + \Delta\varphi\right) + I'_{noise} \quad (8)$$

式中: λ 为激光波长; $s(t)$ 为振动目标的瞬时振动位移; $\Delta\varphi$ 为初始相位差。

2 系统硬件平台

本文实验中选用的硬件开发平台为: Spectrum 公司的 M4i.4421-x8 开发板。对于板卡的采样, 是根据其时钟晶振来调节采样频率的。触发采样的时钟 Clock (PLL)以 4ns (250 MHz)为基准的整 2 倍数来选择(8、16、32、64、...)。而该板卡的触发时间最小为 4ns, 最大为 1.049 ms ($2^{20}ns$), 对应的采样频率 F_s , 最小为 953 Hz, 最大为 250 MHz。

当使用板卡的多段记录模式进行采样时, 具体采样过程如图 3 所示。

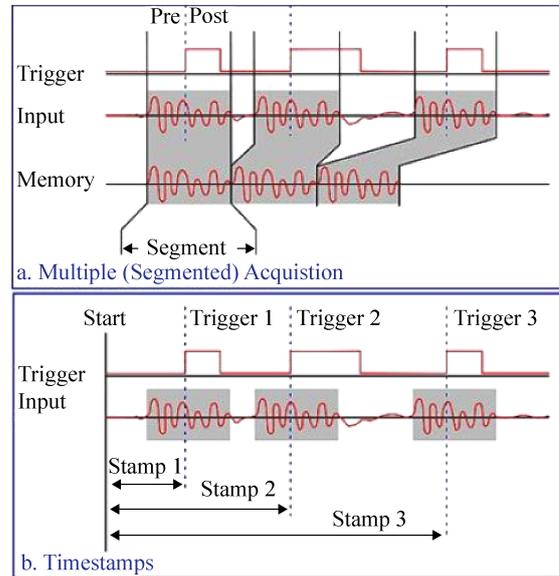


图 3 多段触发采样存储示意图
Fig. 3 Schematic of multi-segment trigger sampling and storage

3 测量约束解析

由于本文方案是基于激光多普勒效应进行的目标物体径向速度和振动的测量, 首先是从原始输入信号上提取频率取得速度值(后文称为一次测频), 然后再基于一段时间内的速度序列波形提取速度变化的频率值(后文称为二次测频)以得到目标的振动信息。而对于不同的输入信号特性, 比如输入信号的采样率、数据长度、时间间隔、以及零差或外差的测量方式, 使得在不同状态下的测量会受到一些方面的约束, 其中最为重要的就是可测量范围和测量分辨率, 直接决定了测量结果的精细度和准确度。接下来将沿着数据的处理流程对这些约束逐一进行解析。

3.1 一次测频—多普勒速度测量

对获取的光电流信号, 两采样点之间的时间间隔为 ΔT_{point} , 对应数据的采样率 $F_s = \frac{1}{\Delta T_{point}}$, 此时频谱分辨率为: $\Delta f = \frac{F_s}{N_{seg}} = \frac{1}{\Delta T_{point} \cdot N_{seg}}$ 。

由奈奎斯特采样定律,信道的极限速率等于信道带宽的2倍,即信号的最高可测频率为采样频率的1/2,即 $F_s/2$ 。对于本文采用的M4i.4421-x8开发板,可得测频分辨率最小为0.93 Hz,对应测频范围476.84 Hz;最大为244.14 KHz,对应测频范围125 MHz。代入多普勒频移转换公式(4),有速度测量为 $V = \frac{f_D \cdot \lambda}{2}$,选用 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的输入光谱,得到多普勒测速的最大值为96.875 m/s,最小值为0.000 37 m/s,即多普勒速度的测量范围仅与采集板卡的数据采样率 F_s 相关。

而测速的分辨率,与数据采样率 F_s 和每段的采样点数 N_{seg} 都相关。当 N_{seg} 越大则分辨率越小(精度越高),但同时计算量也相应的越大。对 N_{seg} 的选取,主要关系到DFT或FFT的计算量。 N 点的DFT共需要 N^2 次复数乘法和 $N(N-1)$ 次复数加法;而FFT需要 $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ 次复数乘法和 $N \cdot \log_2 N$ 次复数加法,效率比为 $\frac{2N}{\log_2 N}$ 。可见,即便采用FFT变换,求取频率的计算量也是随着 N_{seg} 的取值呈非线性发散形式而增大的。

连续采样为采集模块在一定时间内不停的采集光信号并存储,是不考虑或者有另外的线程负责数据的计算处理的,对应于以文件形式存储原始采样数据之后再另行提取分析的后处理(非实时处理)模式。而在实际工程系统中,为了保证数据的

时序性和稳定性,需要采用实时处理模式,即采集一个segment之后立马计算处理,处理完之后再进行下一个segment的采集。此时的前后segment之间就会产生时间空隙,为前一个segment的数据处理运算时间。如图4所示。

测试软件demo界面如图5、图6所示。假设实验中采用的系统采样率为 $F_s = 250 \text{ MHz}$,对应的频率测量范围125 MHz,而测频的分辨率为 $\Delta f = F_s/N_{seg}$ 。当segment数据长度 N_{seg} 取1 024时,分辨率约为250 KHz,此时每个segment的采样时间为 $\Delta T_{collect} = \frac{N_{seg}}{F_s} = \frac{1024}{250M} \approx \frac{1}{250K} = 4 \mu s$,即原采样数据一次测频分辨率的倒数。而对应的数据计算处理的时间 $\Delta T_{calculate}$ 则由计算机的CPU性能和数据长度 N_{seg} 共同决定,处理时间随CPU处理速度增长而变小,与 N_{seg} 则成非线性发散关系的生长。由此可见,相邻两个segment之间的实际时间间隔为 $\Delta T_{aver-loop} = \Delta T_{collect} + \Delta T_{calculate}$ 。当程序采用后处理方式时 $\Delta T_{calculate} = 0$,相当于各个segment无间隙连续采样;而在实时处理模式下, $\Delta T_{collect}$ 和 $\Delta T_{calculate}$ 都会随着 N_{seg} 改变,且所占比例不尽相同。当 N_{seg} 较小时, $\Delta T_{collect}$ 占比较大;反之则 $\Delta T_{calculate}$ 占时间间隔的大部分比例。需要指出的是,实际的每个 $\Delta T_{calculate}$ 存在些许的差异,使得数据间隔并不一致, $\Delta T_{aver-loop}$ 为等效的平均值,均匀化处理的方法在下一节介绍。

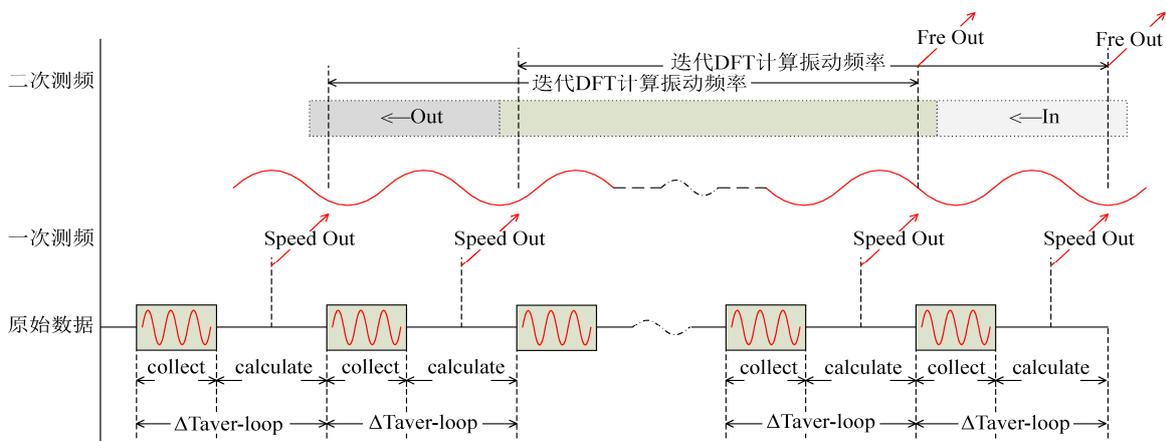


图4 数据实时处理模式示意图

Fig. 4 Schematic of real-time data processing mode

<http://www.china-simulation.com>

• 1930 •

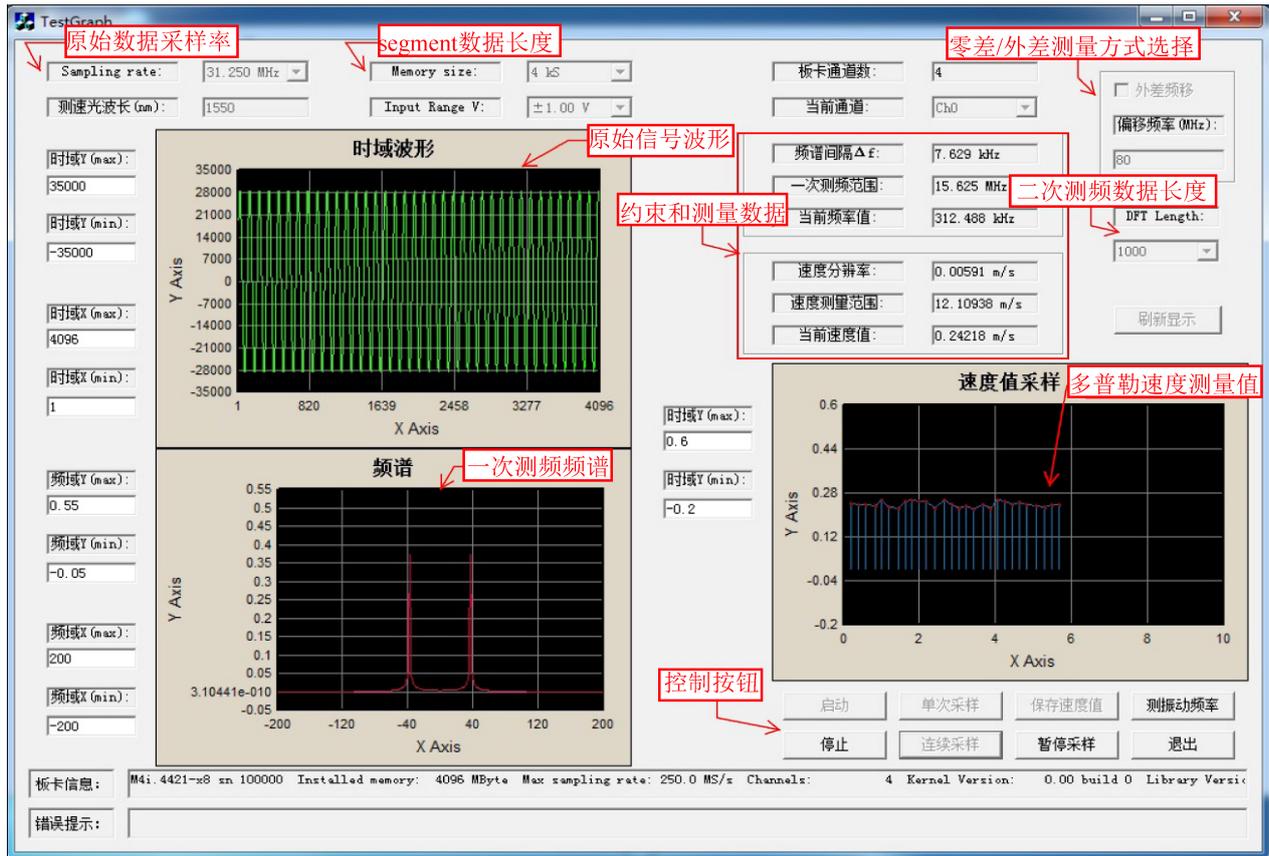


图 5 测试软件 demo 界面(测多普勒速度)

Fig. 5 Test software demo interface (Doppler velocity measurement)

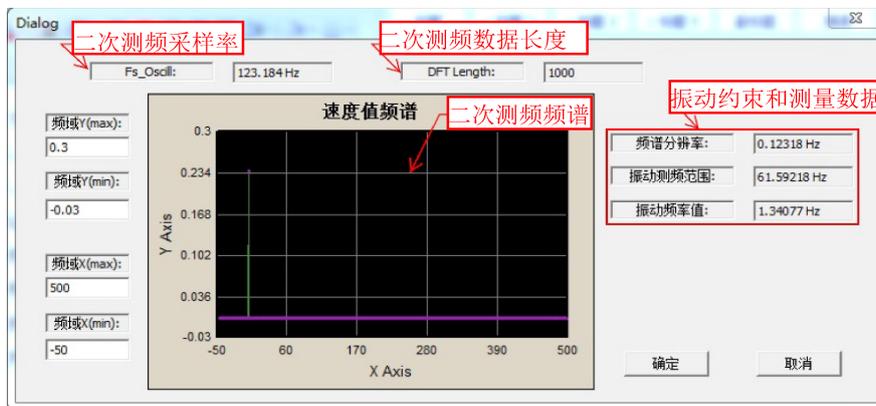


图 6 测试软件 demo 界面(测振动频率)

Fig. 6 Test software demo interface (vibration frequency measurement)

3.2 二次测频—振动目标频率测量

每个 segment 的计算得出的是在 $\Delta T_{collect}$ 时间内获取的一个速度点, 需要一段时间内的速度点序列组成的波形才能描述振动的特性(如图 4 所示), 所以实际上二次测频的采样率为 $Fs' = \frac{1}{\Delta T_{aver-loop}}$ 。

对于振动目标而言, 一次采样率限定了可测量(速度量)的振动幅值范围, 二次采样率则限定了其可测量的振动频率范围。由简谐振动的公式 $x = A \cos(2\pi ft + \varphi)$ 可知, 幅值 A 、频率 f 、相位 φ 是三大基本参数, 能够唯一地确定振动信号的运行轨迹。当目标振动幅值太小时, 说明信号很弱, 测量

中很容易受到环境噪声的影响而导致错误;而当目标振动幅值太大时,需要注意由一次采样率限定的振动幅值范围的约束,当实际幅值超出测量范围时,所得信号将呈现“削顶”现象。

假设待测目标的实际振动频率约为 50 Hz, $F_s=250$ MHz, $N_{seg}=1\ 024$ 时,若是连续采样后处理,满足约 50 Hz 的测量分辨率,则二次采样至少需要 5 000 个点,对应时间长度约 20 ms;若为非连续采样实时处理,如等待时长为每 16 μ s 出一个速度值,此时相当于二次采样频率为 62.5 KHz,此时二次采样至少需要 1 250 个点,对应时间长度也是约 20 ms。可见目标振动频率的分辨率仅取决于所选数据段对应的时间长度,而与数据采样率、采集方式等因素无关。

4 数据间隔均匀化处理

在信号处理理论中,无论是 DFT 或是 FFT 都有一个前提,就是输入信号为等间隔采样。对于一次测频采样,其采样间隔是由硬件系统上的采样触发时钟所保证的,无须额外考虑;但是对于振动测量的二次测频采样,则是取决于处理算法的资源开销,需要特别对待。

二次测频采样的均匀性,对应于图 4 中每输出一个速度值所消耗的时间间隔的均匀性,数据采集部分的 $\Delta T_{collect}$ 决于硬件时钟,对各个 segment 基本是完全一致的,故实际上需要处理的主要是 $\Delta T_{calculate}$ 的均匀性。根据对数据处理算法的时间复杂度和计算机资源开销的影响,主要有以下几个因素需要做优化处理:

a) 显示函数。原始波形数据及经算法处理后的结果都是需要在软件界面上以图形表现出来才能够让观察者直观感受的。图像是对数据的直接呈现,但将内存中的计算数据以图形形式表现出来所调用的显示函数需要占用很多 CPU 资源,使得其时间开销远大于数据算法处理部分。如果每处理一段 segment 数据都调用显示函数的话,将会使得程序的数据处理速度大打折扣($\Delta T_{aver-loop}$ 变

大, F_s 大幅减小),同时会限制目标的振动频率测量范围。如表 1 所示。

表 2 不同条件下的 $\Delta T_{aver-loop}$ 对比
Tab. 1 Comparison of $\Delta T_{aver-loop}$ under different conditions

Segment 数据长度	$N_{seg}=1\ 024$	$N_{seg}=4\ 096$	$N_{seg}=4\ 096$
是否调用 显示函数	不调用	不调用	调用
时间开销/ms	0.47	1.953	35.479

在实验中发现单次 segment 数据的计算处理 (FFT) 时间消耗在 ms 量级,对人眼而言过高的刷新率是看不过来的,即并不需要每个 segment 的处理结果都显示出来,所以可调节为每 M 个 segment 结果调用一次显示函数即可。而调用显示函数和非调用处理所造成的时间开销的差异则需要采用多线程和内存拷贝的手段进行调节,即每隔 M 个 segment 将算法处理的结果拷贝至另一段用于显示的内存,计算和显示通过不同的线程分别处理,以此排除显示函数对数据处理时间开销的影响。

b) 二次测频计算,迭代 DFT。对于速度值的二次测频也是需要计算处理的,即对于一次测频的结果输出 speed 作为二次测频的采样输入,再往上一层级做计算处理(如图 4 所示)。考虑到每个 segment 只更新一个速度值(二次采样点),此时求取振动频率可以采用迭代 DFT 来执行,时间复杂度仅为 $O(N)$,相对于直接的 FFT 而言计算量能够大幅减小^[14]。

c) 等时差 Lagrange 插值。在之前两种处理之后,能够使得每个 segment 的 calculate 时间开销基本处于同一量级,但由于输入数据等同量级差异还是存在,可采用 Lagrange 插值的方法来处理。具体实现方式为:根据一段二次测频的数据长度(如 100 个 segment)的时间消耗计算出一个平均时间间隔,然后依据各个 segment 的时标信息为基准进行 Lagrange 二次插值,获得均匀时间间隔的二次测频输入数据。如图 7 所示。

经仿真实验验证,如此处理之后,能够保证二次测频数据的均匀性和测量结果的稳定性。

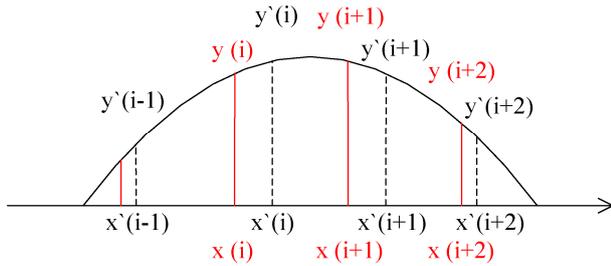


图 7 等时差 Lagrange 插值示意图
Fig. 7 Schematic of equal time interval Lagrange interpolation

5 外差式测量的频率混叠约束

如公式(7)所示, 通过直接耦合本振光和信号光所得的差频信号是相对于零频位置的偏移量, 由此得到的速度量是无法分辨方向的; 且目标振动时, 由于只能获得绝对值信息, 振动波形是经过零点翻转而产生畸变的。同时由于噪声信号的存在, 使得速度接近零点时会受到干扰而导致探测错误。

针对这个问题, 外差激光测量方法通过在本振光的光路中加入声光调制器(移频器), 使得本振光和信号光之间产生一个固定的频率偏移, 最后得到中心频率为声光移频器频偏 f_r 、调制频率为振动界面引起的多普勒频移量 f_D 的调频信号。即探测到的信号实际频移范围为: $(f_r - f_D) \sim (f_r + f_D)$, 以此获得探测目标的速度方向和振动信号的完整波形。

当加入声光调制器后, 采集端所得的信号频率就存在固定偏移 f_r , 此时若信号采样率不足时便会产生频率混叠的问题。在本文的实验中, 只有 80 MHz 的定频声光调制器, 根据奈奎斯特采样定律, 当信号采样率 F_s 选择小于 125 M 时, f_r 会超出原测频范围, 产生频率混叠现象。

考虑到测频分辨率和算法计算量等要求限

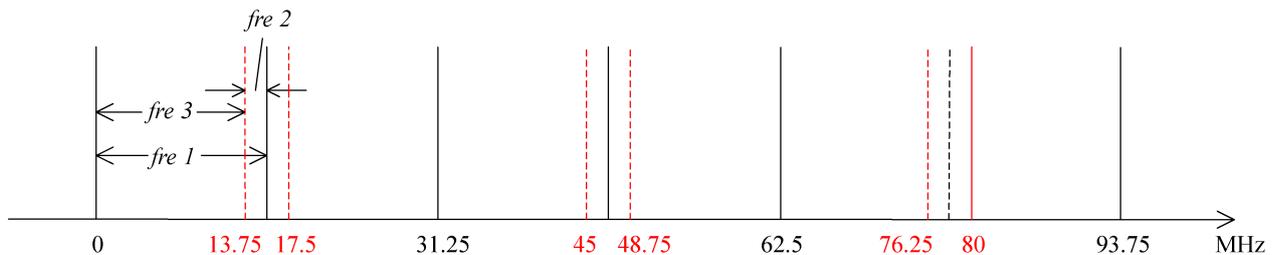


图 8 频率混叠效应示意图
Fig. 8 Schematic of frequency aliasing effect

制, 有时需要较低的信号采样频率条件下测量 f_D 。此时的频率混叠指的是参考光偏移频率 f_r 产生混叠现象, 因为 f_r 仅作为频率位置的参考线而非真正的待测值。只要 F_s 的选取不影响 f_D 的计算时, 就可以在 f_r 的混叠状态下进行探测, 即真实需要测量的多普勒频移 f_D 不能产生混叠。因此多普勒频移 f_D 的实际探测范围就由信号采样率 F_s 和声光调制器频偏 f_r 的对应关系来决定。

如图 8 所示, 例如选取原始信号采样率 $F_s = 31.25$ MHz、声光调制器频偏 $f_r = 80$ MHz, 此时对原始信号作 FFT 变换, 理论上的可测频范围 $fre1 = F_s/2 = 15.625$ MHz。由于频率混叠, f_r 落在 $fre1$ 范围内的对应值为 13.75 MHz, 而 13.75 MHz 可能对应的混叠前频率有: 17.5 MHz、45 MHz、48.75 MHz、76.25 MHz、80 MHz ...。当多普勒频移 f_D 超出实测范围(图 8 中 $fre2$ 和 $fre3$ 的较小值)时, f_D 也将进入混叠状态而变得不唯一, 从而导致测量出错。所以, $\min(fre2, fre3)$ 则为外差测量方法中多普勒频移 f_D 的可测量范围。即在外差激光测量方法中, 信号的可测频率(一次测频)范围如式(9)所示。

$$f_{D-Range} = \min[\text{mod}(f_r, F_s/2), F_s/2 - \text{mod}(f_r, F_s/2)] \quad (9)$$

可见外差测量相对于零差测量而言, 虽然能够得到目标速度的方向, 代价却是测量范围被大幅压缩, 甚至某些 F_s 的取值会导致目标速度可测量范围太小而出现问题。另外, 在实际探测过程中还需要考虑频谱中 f_r 旁瓣效应对算法识别提取 f_D 的影响。

6 结论

本文介绍了激光多普勒测速测振系统的工作原理,分析了一次测量(测速)和二次测量(测振)的测量范围及测量分辨率。提出了数据间隔均匀化的处理方法,以及外差探测时参考光固定频偏 f_r 发生频率混叠时对多普勒频差 f_D 测量的影响。给出了详细的理论计算推导公式和图表,编写了实际的软件Demo予以验证。经实验验证,无论对于信号发生器输出的标准波形,或是实际的50 Hz 振动器目标,本文算法都能够实时输出非常精确的测量结果。

国外的激光多普勒测量技术已由试验研究进入了实用化阶段,而国内的介绍和研究资料则相对较少,且主要集中在光路和机械机构方面的探讨。本文从数字信号处理的角度,分析最为基本的多普勒零差、外差测量技术的原理,给出了诸如测量范围、测量分辨率、数据间隔均匀化、频率混叠等技术指标的理论依据和相关处理方法,作为对激光多普勒测量技术的学习研究和后续进展的参考,有利于促进国内激光测量技术的进一步研究和发展。

参考文献:

- [1] 闫宝东. 脉冲光纤相干测风激光雷达初步设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Yan Baodong. Preliminary Design of Fiber Pulsed Coherent Wind Lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [2] 孟雪. 激光多普勒干涉振动测量技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
Meng Xue. Research on Vibration Measurement Technology of Laser Doppler Interferometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [3] 王豹亭. 零差激光测振技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
Wang Baoting. Study on Homodyne Laser Vibrometer Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [4] 李丽艳. 用于多普勒干涉测振的光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
Li Liyan. Study on Optical System of Doppler Interference Vibrometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- [5] 姚欣. 激光多普勒振动检测技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
Yao Xin. Research on Laser Doppler Vibration Detection Technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [6] 刘杰坤, 马修水, 马懿. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
Liu Jiekun, Ma Xiushui, Ma Xie. Review of Laser Doppler Vibrometer[J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 1-5.
- [7] 吕宏诗, 刘彬. 激光多普勒测振技术的最新进展[J]. 激光技术, 2005, 29(2): 176-179.
Lv Hongshi, Liu Bin. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement[J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 176-179.
- [8] 刘光海, 雷伟国. 全光纤激光干涉测振技术研究[C]// 全国非线性动力学和运动稳定性学术会议, 2013.
Liu Guanghai, Lei Weiguo. Study on All Fiber Laser Interference Measurement Technology[C]// Conference of Nonlinear Dynamics and Motion Stability, 2013.
- [9] 尚建华, 任立红, 徐海芹, 等. 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1149-1155.
Shang Jianhua, Ren Lihong, Xu Haiqin, et al. Heterodyne laser Doppler vibrometer based on double acousto-optic frequency shifters[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1149-1155.
- [10] 尚建华, 赵曙光, 贺岩, 等. 外差式激光多普勒测振计的最小可分辨速度研究[J]. 中国光学快报, 2011, 9(8): 1-3.
Shang Jianhua, Zhao Shuguang, He Yan, et al. Experimental study on minimum resolvable velocity for heterodyne laser Doppler vibrometry[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 1-3.
- [11] 杨春平, 康美苓, 王豹亭, 等. 新型零差激光干涉仪振动测量系统[J]. 光电子: 激光, 2011(1): 95-98.
Yang Chunping, Kang Meiling, Wang Baoting, et al. Novel vibration measurement system based on homodyne laser interferometer[J]. Journal of Optoelectronics: Laser, 2011(1): 95-98.
- [12] 曹勇, 熊伟, 沈斌, 等. 激光干涉原理在振动测量中的应用[J]. 现代电子技术, 2009, 21(1): 210-212.
Cao Yong, Xiong Wei, Shen Bin, et al. Application of Laser Interferometer Principle in Measurement of Vibration[J]. Modern Electronic Technology, 2009, 21(1): 210-212.
- [13] 尚建华, 贺岩, 刘丹, 等. 激光多普勒振动计用于实时语音信号获取[J]. 中国光学快报, 2009, 7(8): 732-733.
Shang Jianhua, He Yan, Liu Dan, et al. Laser Doppler vibrometer for real-time speech-signal acquirement[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(8): 732-733.
- [14] 周柯, 罗安, 彭剑. 基于滑窗迭代 DFT 的电力谐波检测[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 27-30.
Zhou Ke, Luo An, Peng Jian. Harmonic detection based on sliding-window iterative algorithm of DFT[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(3): 27-30.