

# 基于混合编程的高精度激光多普勒信号处理技术

刘帆 金世龙 刘军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 针对激光多普勒信号中存在较大噪声干扰的实际情况,为了抑制这些噪声干扰,提高激光多普勒测速仪的测量精度,提出了对激光多普勒信号进行最小均方差(LMS)自适应滤波后作快速傅里叶变换(FFT),基于混合编程思想对所得到的频谱,先进行频谱细化,再进行频谱校正的信号处理方法,并对理想正弦信号和实测多普勒信号分别进行仿真计算和实验研究。仿真和实验结果表明:LMS自适应滤波技术可以有效抑制激光多普勒测量中的多频率噪声的干扰,此技术能够适应于很宽的信噪比范围,大大提高多普勒信号的信噪比;频谱细化技术可以提高激光多普勒信号的频谱分辨率,频谱校正技术可以准确地校正多普勒频率,使校正后的频率更加接近于真实值;信号处理精度比直接进行FFT提高2~3倍。

**关键词** 信号处理;激光多普勒测速仪;混合编程;最小均方差自适应滤波;频谱细化;频谱校正

**中图分类号** TP391; TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s109003

## High Accuracy Signal Processing Technology in Laser Doppler Velocimeter Based on Mixed Programming

Liu Fan Jin Shilong Liu Jun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A new method of signal processing is proposed in this article in order to eliminate the noise interference and enhance the measurement accuracy of laser Doppler velocimeter (LDV). The least mean square (LMS) adaptive filter technology, the frequency spectrum zooming and frequency spectrum correction technology are applied in the signal processing system. Basic principle of LMS adaptive filter and frequency analysis algorithms were expounded first, then spectrum simulation of ideal sinusoidal signal and experiment test are studied based on these algorithms. The simulation and experiment results indicate that the LMS adaptive filter technology has effectively improved signal to noise ratio and minish the interference of noise; Resolution of frequency spectrum can be improved by frequency spectrum zooming technology and the accuracy of signal processing can be greatly improved by frequency spectrum correction technology. It can obviously increase the frequency spectrum resolution, and improve the measurement accuracy for 2~3 times.

**Key words** signal processing; laser Doppler velocimeter; mixed programming; least mean square adaptive filter; frequency spectrum zooming; frequency spectrum correction

**OCIS codes** 070.1170; 200.4560; 250.4745

## 1 引言

自从1964年Yeh等<sup>[1]</sup>证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体的速度,激光多普勒测速仪(LDV)以其测速精度高、测速范围广、空间分辨率高、动态响应快、非接触测量等优点,在航空、航天、机械、能源等领域得到广泛的应用和快速的发

展<sup>[2~6]</sup>。由于有效散射光很弱且受声光调制器、杂散光等因素的影响<sup>[7]</sup>,使得激光多普勒信号信噪比较低。然而LDV的测速精度主要取决于多普勒信号的处理<sup>[8]</sup>,因此提高多普勒信号的处理精度是提高LDV测速精度的关键。

与传统的滤波方法相比,最小均方差(LMS)自

收稿日期: 2011-08-20; 收到修改稿日期: 2011-10-11

作者简介: 刘帆(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: fanliu@live.cn

导师简介: 金世龙(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: s\_l\_jin@hotmail.com

适应滤波技术不需要预先知道干扰噪声的统计特性,它能在逐次迭代的过程中将滤波器的工作状态自适应地调整到最佳,对抑制宽带噪声和窄带噪声都有效。目前,提取多普勒信号频率最常见的方法是快速傅里叶变换(FFT),如果直接将FFT结果的峰值谱对应的频率作为多普勒频率值,则存在精度较低的问题。这是因为受到FFT的频谱分辨率 $\Delta f=f_s/N$ 的限制,其中 $f_s$ 为采样频率, $N$ 为采样点数。为此,可以引入频谱细化技术,它犹如摄像机中用变焦镜头放大整个画面中的局部图像一样,使某些感兴趣的局部重点频段得到较高的分辨率。同时频谱校正技术能够在不增加采样点数的前提下大幅度提高分析精度,从而获得精确的多普勒频率。本文基于混合编程思想,在LabView平台调用Matlab函数设计LMS自适应滤波器和频谱细化、频谱校正算法,并分别应用于理想正弦信号和实测多普勒信号进行仿真计算和实测研究。

## 2 激光多普勒测速的基本原理

当激光照射在运动物体上时,就会在物体表面发生漫反射现象,经运动物体散射回来光波的频率相对于入射光波将会发生一个偏移量,这个偏移量就是多普勒频移。在讨论光波的多普勒频移时,要用到相对论原理来处理,如图1所示。

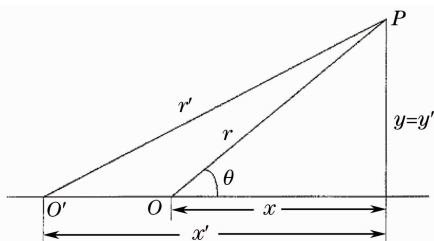


图1 相对运动中的参考系之间的坐标变换  
Fig.1 Coordinate transformation of the frame of references which move relatively

图1详述了两参考系的坐标变换,观察者静止位于原点 $O'$ ,在这个坐标系中来判断接收的辐射频率和波长。另一参考系原点为 $O$ ,其中的光源是静止的,发出的辐射起源于这个参考系。

现考虑以光速 $c$ 在参考系 $O$ 中传播的平面波,其波动方程可以写为

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu \left( t - \frac{r}{c} + \delta \right) = E_0 \cos 2\pi\nu \left( t - \frac{x \cos \theta}{c} - \frac{y \sin \theta}{c} + \delta \right), \quad (1)$$

式中 $\nu$ 是光波的频率, $r$ 是波沿传播方向的距离, $\delta$ 是

相位常数, $\theta$ 是波传播方向与 $x$ 轴的夹角。假设参考系 $O$ 以速度 $v$ 在 $x$ 方向相对参考系 $O'$ 移动,在 $O'$ 系统中点的坐标为 $(x', y', t')$ 。可以用Lorentz变换<sup>[9]</sup>,从一个坐标系变换到另外一个坐标系中,即

$$x = \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y', \quad t = \frac{t' - vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu' \left( t' - \frac{x' \cos \theta'}{c} - \frac{y' \sin \theta'}{c} + \delta \right), \quad (3)$$

其中

$$\nu' = \frac{\nu}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right), \quad (4)$$

$\theta'$ 可由下式来确定:

$$\cos \theta' = \frac{\cos \theta + v/c}{1 + (v/c) \cos \theta}. \quad (5)$$

因此由于 $O$ 的运动在 $O'$ 系统中观察到的多普勒频移为

$$\Delta\nu = \nu - \nu' = \nu \left[ \frac{1 + (v/c) \cos \theta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right], \quad (6)$$

只考虑一次项 $v/c$ 时,由于一般情况下 $\nu$ 远小于 $c$ ,所以这种假设是成立的。多普勒频移为

$$\Delta\nu = \mu \frac{v}{c} \cos \theta. \quad (7)$$

从(7)式可以看出多普勒频移量与粒子运动速度成线性正比关系,可以通过探测系统中的多普勒频移量求得待测粒子的运动速度。

## 3 信号处理技术

### 3.1 混合编程

NI公司开发的基于G语言编程的LabView软件平台,其用户界面丰富灵活,可与多种编程语言(Matlab,C等)嵌套,有一个功能强大的函数库,但在控制算法实现方面较薄弱,限制了它的快速开发。而Matlab提供了强大的矩阵运算功能和丰富的工程计算领域工具箱,编程效率高,但Matlab的界面开发能力较差,并且数据输入、硬件控制等方面都比较繁琐。鉴于二者的特点和激光多普勒信号处理滤波器和频谱分析算法设计的需要,采用了LabView和Matlab相嵌套的方法来实现激光多普勒信号处理系统的设计。用LabView设计用户图形界面,负责数据采集和网络通信,用Matlab对采集的信号进行分析处理,处理结果供LabView调用。充分利用LabView的图形化编程能力和Matlab提供的大量

高效可靠的算法。

### 3.2 LMS 自适应滤波技术

自适应滤波器不需要预先知道干扰噪声的统计特性,它利用干扰噪声与被测信号不相关的特点,通过采用期望值和负反馈值进行综合判断的方法来改变滤波器的参数,自适应地调整滤波器的传输特性,尽可能地抑制和衰减干扰噪声,以提高信号的信噪比。美国斯坦福大学的 Widrow 和 Hoff 在自适应理论方面做出了开创性的工作,提出了 LMS 自适应算法<sup>[10]</sup>。自适应算法的出现,极大地促进了自适应信号处理的理论研究和应用。目前,自适应理论已广泛应用于信号处理的各个方面—信号的检测、处理、控制等<sup>[11]</sup>。

LMS 自适应滤波器由参数可调的数字滤波器和 LMS 系数修正自适应算法两部分组成,如图 2 所示。输入信号  $x(n)$  通过参数可调的数字滤波器后产生输出信号(或响应) $\tilde{y}(n)$ ,将其与期望信号  $y(n)$  进行比较,得到误差  $e(n) = y(n) - \tilde{y}(n)$ ,并以此通过 LMS 自适应算法对滤波器参数进行调整。如此循环,最终使误差  $e(n)$  的均方值最小,使得滤波器的输出  $\tilde{y}(n)$  尽可能地逼近期望信号,最大限度地滤除噪声。

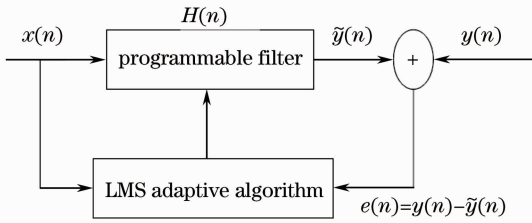


图 2 LMS 自适应滤波原理框图

Fig. 2 Schematic of LMS adaptive filter

### 3.3 Chirp-Z 频谱细化技术

离散频谱细化分析方法是 20 世纪 70 年代发展起来的一项技术,其目的是识别谱图上的细微结构。频谱细化方法<sup>[12]</sup>有多种,考虑计算精度、速度、算法实现的难易程度以及激光多普勒信号的特点,选用 Chirp-Z 频谱细化算法。

已知  $x(n)$  ( $0 \leq n \leq N-1$ ) 是有限长序列,其  $z$  变换为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z^{-n}, \quad (8)$$

沿  $z$  平面的一段螺旋线作等分角的抽样, $z$  的这些抽样点  $z_k$  为

$$z_k = AW^{-k} (k = 0, 1, \dots, M-1), \quad (9)$$

式中  $M$  为要分析的复频谱点数, $A$  和  $W$  都是任意复

数,可表示为  $A = A_0 \exp(j\theta_0)$ ,  $W = W_0 \exp(-j\phi_0)$ 。

当  $M = N$ ,  $A = A_0 \exp(j\theta_0) = 1$ ,  $W = W_0 \exp(-j\phi_0) = \exp(-j \frac{2\pi}{N})$  (即  $W_0 = 1$ ,  $\phi_0 = \frac{2\pi}{N}$ ) 这一特殊情况时,各  $z_k$  就均匀等间隔地分布在单位圆上,这就是求序列的离散傅里叶变换(DFT)。

将(9)式代入(8)式中,可得

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z_k^{-n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk} \quad (0 \leq k \leq M-1) \quad (10)$$

若直接运用这一公式,与直接计算 DFT 一样,运算量很大,限制了运算速度。可以采用布鲁斯坦等式

$$nk = \frac{1}{2}[n^2 + k^2 - (k-n)^2], \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式中,有

$$X(z_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)A^{-n}W^{nk} = W^{k^2/2} \sum_{n=0}^{N-1} [x(n)A^{-n}W^{n^2/2}]W^{[-(k-n)^2]/2} \quad (0 \leq k \leq M-1) \quad (12)$$

令  $g(n) = x(n)A^{-n}W^{n^2/2}$ ,  $h(n) = W^{-n^2/2}$  ( $n = 0, 1, \dots, N-1$ ), 则

$$X(z_k) = W^{k^2/2} \sum_{n=0}^{N-1} g(n)h(k-n) = W^{k^2/2} [g(k) * h(k)], \quad (k = 0, 1, \dots, M-1) \quad (13)$$

由(13)式可以看出,  $z_k$  点的  $z$  变换可以通过求  $g(k)$  和  $h(k)$  的线性卷积,然后乘以  $W^{k^2/2}$  得到。当满足  $M = N$ ,  $A = A_0 \exp(j\theta_0) = 1$ ,  $W = W_0 \exp(-j\phi_0) = \exp(-j \frac{2\pi}{N})$  条件时,即是求得了序列上所关心的需要细化的频谱段 DFT 值。

序列  $h(n) = W^{-n^2/2}$  可以看作是频率随时间  $n$  成线性增长的复指数序列,在雷达系统中这种信号称为线性调频信号(Chirp signal),因此这里的变换称为线性调频  $z$  变换(Chirp-Z 变换)。

### 3.4 比值法频谱校正技术

离散频谱的比值校正法主要利用归一化后差值为 1 的主瓣峰顶附近两条谱线的窗谱函数的比值,建立一个以校正频率为变量的方程,解算出频率校正量<sup>[13]</sup>,进而得到主瓣中心的频率,即信号的真实峰值频率。以汉宁窗为例,  $y_k$  为离散频谱的幅度值,归一化的频率校正量  $\Delta k$  为

$$\Delta k = \begin{cases} \frac{2y_{k+1} - y_k}{y_{k+1} + y_k} (y_{k+1} \geq y_k) \\ \frac{2y_k - y_{k-1}}{y_k + y_{k-1}} (y_{k+1} < y_k) \end{cases} \quad (14)$$

这样校正以后的频率就为

$$f_k = (k + \Delta k) f_s / N, \quad (15)$$

式中  $f_s$  为采样频率,  $N$  为采样点数。

## 4 信号处理仿真研究

### 4.1 LMS 自适应滤波技术

在 Matlab 平台上进行 LMS 自适应滤波的仿真, 仿真的理想正弦信号为  $x(t) = \sin(2\pi \times 5000t)$ , 叠加上均值为 0、标准差为 10 的高斯白噪声。由于多普勒信号信噪比很低, 因此给理想正弦信号叠加上幅度较大的高斯白噪声。编写 LMS 自适应滤波的算法, 对叠加了高斯白噪声的信号进行自适应滤波。图 3 给出了周期信号、叠加了高斯白噪声的信号和 LMS 自适应滤波后的信号。

由图 3(a) 和 (b) 对比可知, 叠加进了高斯白噪

声的信号抖动幅度很大, 周期信号被淹没在噪声里, 无法分辨出来。从图 3(c) 可以看出, LMS 自适应滤波后, 经过一系列的反馈迭代自适应调整, LMS 自适应算法很快地找到了最佳的滤波系数。滤波后的信号很快地收敛, 没有了毛刺, 较为平滑, 噪声滤除情况较好。周期信号的频谱、叠加了高斯白噪声信号的频谱以及 LMS 自适应滤波后信号的频谱如图 4 所示。由图 4(a) 得知, 理想正弦信号中频谱只有一个峰值, 没有噪声的干扰。从图 4(b) 中可知叠加了高斯白噪声信号的幅度谱中噪声能量较大, 信号的信噪比约为 5.15 dB, 噪声幅度与信号幅度在同一量级。而由 4(c) 知, 经过自适应滤波后噪声的能量明显减小, 信号的信噪比约为 19.10 dB。图 4 中频谱峰值对应的频率值为 4883 Hz, 而不是程序设定的 5000 Hz, 这是由于 FFT 的频谱分辨率导致的。可以看出 LMS 自适应滤波技术对噪声的抑制作用很明显, 经过滤波后信号的信噪比得到大大增加, 并且此技术能够适应于很宽的信噪比范围。

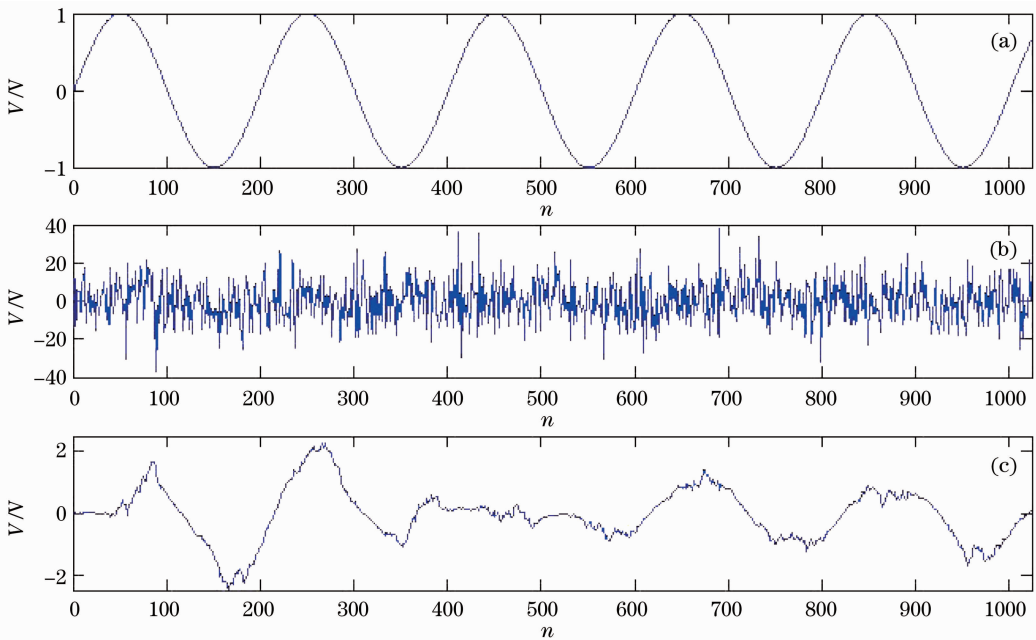


图 3 (a) 周期信号; (b) 叠加大高斯白噪声的信号; (c) LMS 自适应滤波后的信号

Fig. 3 Simulation results (a) periodic signal; (b) signal with Gaussian white noise; (c) signal after LMS adaptive filter

### 4.2 Chirp-Z 频谱细化技术

在 Matlab 平台分别对单一频率的理想正弦信号和频率相近的双频叠加信号进行仿真计算, 可以看出 Chirp-Z 频谱细化算法可以达到细化频谱、提高频谱分辨率的目的, 且细化后的频谱分辨率取决于算法中设定的细化倍数。

#### 4.2.1 对单一频率的理想正弦信号仿真计算

对频率为 20 kHz 的理想正弦信号进行 FFT 变

换, 采样频率  $f_s = 0.2$  MHz, 采样点数为  $N = 64$ , 得到的频谱图如图 5 所示, Chirp-Z 频谱细化算法得到的细化频谱图如图 6 所示。

从图 5 可以看出, 相邻两点的频差为 3125 Hz, 恰好为 FFT 算法的频谱分辨率  $\Delta f = f_s / N$ 。图 6 中, Chirp-Z 频谱细化算法的细化倍数为  $D = 10$ , 观察图中相邻点的频差, 为  $\Delta f' = 312.5$  Hz, 与直接 FFT 的频谱分辨率  $\Delta f$  比较,  $\Delta f' = \Delta f / D$ , 分辨率提高了 10

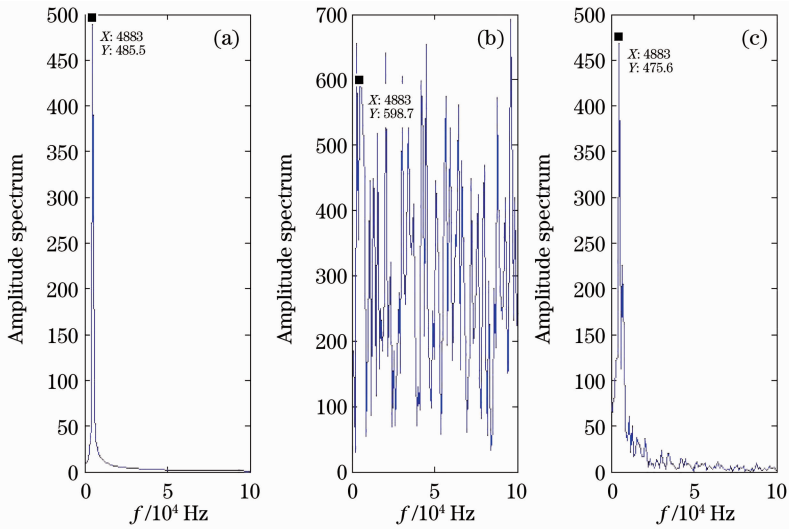


图 4 (a)周期信号的频谱;(b)叠加了高斯白噪声信号的频谱;(c) LMS 自适应滤波后信号的频谱

Fig. 4 Spectrum of signals (a) periodic signal; (b) signal with Gaussian white noise; (c) signal after LMS adaptive filter

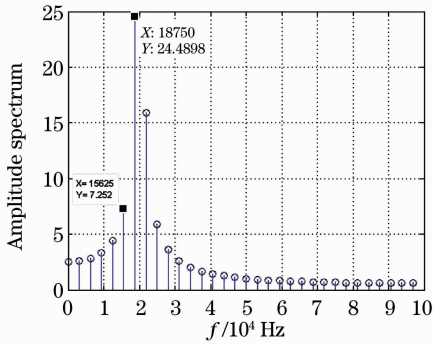


图 5 直接进行 FFT 得到的频谱图

Fig. 5 Spectrum graph of FFT

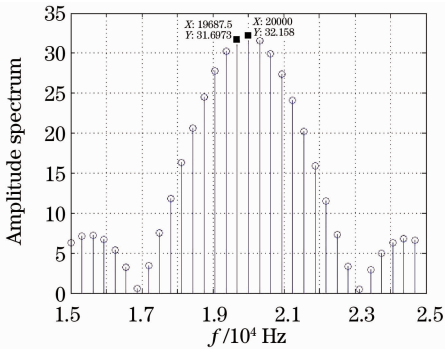


图 6 Chirp-Z 细化算法得到的频谱图

Fig. 6 Chirp-Z zooming algorithm

倍。这就说明,频谱细化算法达到了细化频谱、提高频谱分辨率的目的,且可以设定细化倍数来获取需要的频谱分辨率<sup>[14]</sup>。

#### 4.2.2 相近频率的双频叠加信号仿真计算

对频率分别为 266.4 Hz 和 266.6 Hz 的理想正弦叠加信号进行 FFT 变换,采样频率  $f_s = 1000$  Hz,采样点数为  $N = 4096$ ,信号表达式为  $x = \sin(2\pi \times$

$266.4t) + \sin(2\pi \times 266.6t)$ ,得到的频谱图见图 7。

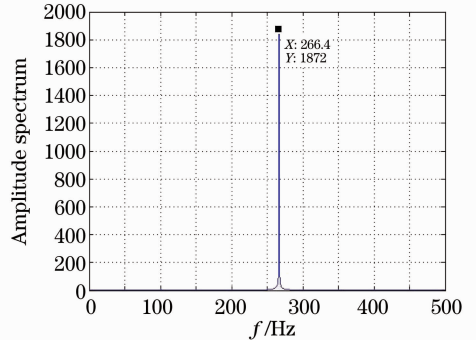


图 7 直接进行 FFT 得到的频谱图

Fig. 7 Spectrum graph of FFT

从图 7 可以看出,直接 FFT 得到的频谱图中只显示了一个峰值,其对应的频率为 266.4 Hz,它不能区分出 266.6 Hz 的谱线,这是因为 FFT 的频谱分辨率  $\Delta f = f_s / N = 0.244$  Hz,而这两个正弦信号频率之差 0.2 Hz 小于其频谱分辨率,达到了 FFT 的频谱分辨率极限。对信号进行 Chirp-Z 细化算法得到的频谱图如图 8 所示,细化倍数  $D = 2$ 。从图上可以看出,Chirp-Z 细化算法可以清楚地分辨出频差小于 FFT 频谱分辨率的 2 个正弦信号的谱峰值,极大地提高了谱线的分辨率。

#### 4.3 比值法频谱校正技术

对频率为 20 kHz 的理想正弦信号进行 FFT 变换,  $f_s = 0.2$  MHz,  $N = 64$ ,得到的频谱图如图 9。

从图 9 可以看出,直接进行 FFT 变换得到的频谱峰值点对应的频率为 18.75 kHz,与理想信号频率 20 kHz 的误差为 6.25%。对 FFT 得到的频谱进行比值法频谱校正得到的校正频谱图如图 10



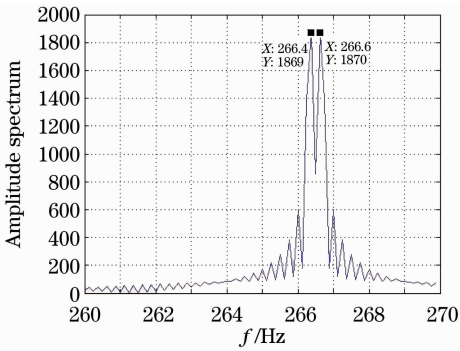


图 8 Chirp-Z 细化算法得到的频谱图  
Fig. 8 Chirp-Z zooming algorithm

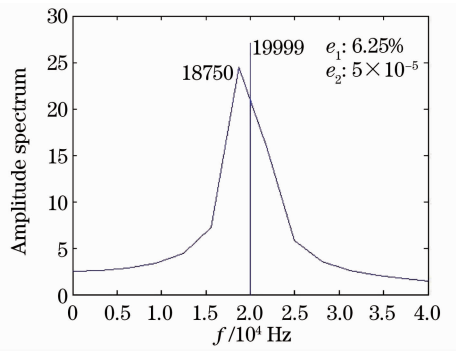


图 10 比值法校正得到的校正频谱图  
Fig. 10 Ratio correction

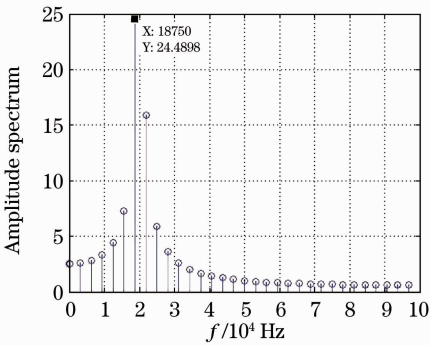


图 9 直接进行 FFT 得到的频谱图  
Fig. 9 Spectrum graph of FFT

所示。从图 10 中得知,经过比值法频谱校正后的频率为 19.999 kHz,误差为 0.005%。可以说,比值频谱校正算法极大地降低了 FFT 变换的误差。

### 5 激光多普勒信号处理实验研究

在自行搭建的激光多普勒测速系统中,选用转速均匀可控的斩波片作为速度源,实验中获得的多普勒信号经过前置放大高通滤波器后由数据采集卡采集,在 LabView 平台基于混合编程思想调用 Matlab 算法对采集的信号进行 LMS 自适应滤波后进行 FFT 变换,再进行频谱细化和频谱校正。

实验中测得多普勒原始信号及其频谱、LMS 自适应滤波后的信号及其频谱如图 11 所示。从图 11(a)中可以看出,光电探测器输出的多普勒信号中存在一些小的毛刺,这是由于低频噪声和直流分量后残留的噪声所引起的;由图 11(b)得知,经过 LMS 自适应滤波后信号中没有了明显的毛刺,较为平滑。

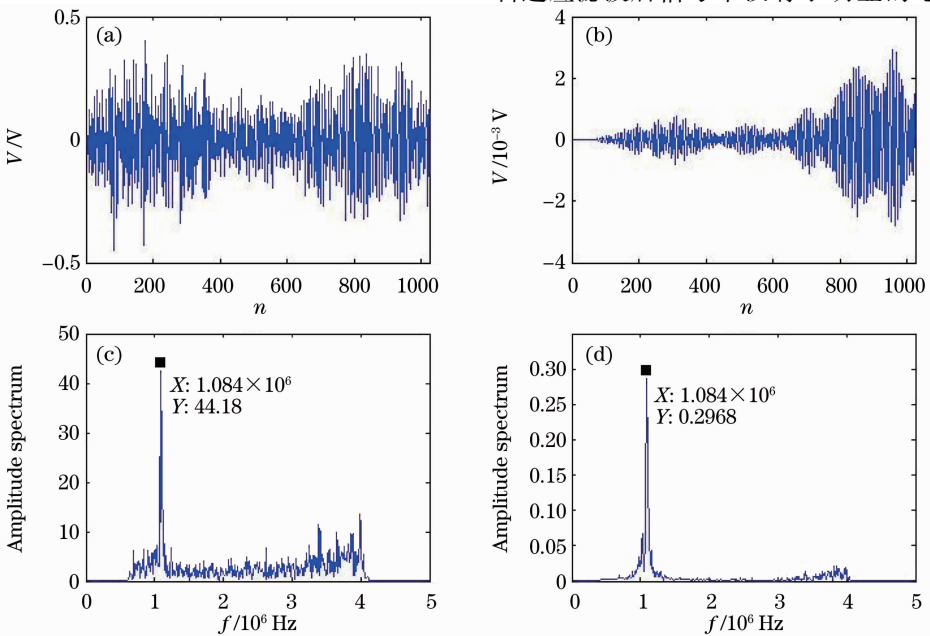


图 11 (a)原始信号;(b) LMS 自适应滤波后的信号;(c)原始信号的频谱;(d) LMS 自适应滤波后信号的频谱  
Fig. 11 Processing of measured signal (a) original signal; (b) signal after LMS adaptive filter; (c) spectrum of original signal; (d) spectrum of signal after filter

图 11(c)是检测到的多普勒信号的频谱图,由图可知,光电探测器输出多普勒信号的频谱中噪声的能量很大,信号的信噪比约为 13.26 dB;图 11(d)是 LMS 自适应滤波信号的频谱图,从中可以看出,经过 LMS 自适应滤波后噪声的能量明显减小,信号的信噪比约为 17.36 dB。所以,经过 LMS 自适应滤波后,信号频谱中的噪声大部分被抑制,信号的信噪比大大提高。同时从频谱图上可以看出,频谱峰值点对应的多普勒频率为 1.084 MHz,相邻两频谱点频率差为  $\Delta f = 10$  kHz。

将 LMS 自适应滤波后的信号进行 Chirp-Z 频谱细化得到的细化频谱图及其比值法频谱校正如图 12 所示,细化倍数  $D=10$ 。从细化频谱图(a)上得知,相邻两频谱点频差为  $\Delta f' = 1$  kHz,  $\Delta f' = \Delta f / D$ ,频谱分辨率提高了 10 倍,达到了细化频谱、提高频谱分辨率的目的。将细化频谱图局部放大后得到如图 12(b)所示的比值法校正图,从图中可以看出,比值法将细化频谱图中的峰值频率 1.0890 MHz 校正为 1.0895 MHz。

在进行激光多普勒测速的同时运用计数法<sup>[15]</sup>测量斩波片旋转的速度,把测得的速度转化为对应多普勒频率。将计数法测量的结果作为标准对比值,以验证频谱细化和频谱校正算法在激光多普勒信号处理中的可行性。运用计数法测量得到的斩波片转速所对应的多普勒频率作为标准对比值进行验证。实验中,待测点到斩波片中心的距离为 3.55 cm,其切向运动的速度方向与光入射方向的夹角为  $54^\circ$ ,斩波片上小孔的数目为 35。此时,光计数法得到的方波信号的频率为 92.234 Hz,进而求得待测点切向运动的线

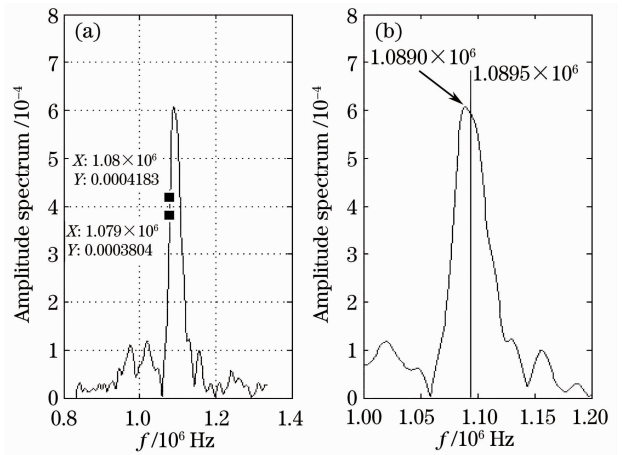


图 12 (a) Chirp-Z 细化算法得到的频谱图;

(b) 比值法频谱校正

Fig. 12 (a) Chirp-Z zooming algorithm;

(b) ratio correction

速度为 0.588 m/s,而计数法测量得到的速度转化为多普勒频率为 1.092 MHz。因此,直接进行 FFT 的信号处理误差为 0.73%,而经过了 Chirp-Z 算法频谱细化和比值法频谱校正后信号处理误差仅为 0.23%。

调节斩波片的转速进行 5 次实验,用计数法测得多普勒频率(标准值),激光多普勒测速法直接进行 FFT 和经过频谱分析(频谱细化和校正)处理后得到的多普勒频率以及误差如表 1 所示。

从表 1 可以看出,以计数法测得多普勒频率为标准值,直接对多普勒信号进行 FFT 变换的误差为频谱细化校正算法误差的 2~3 倍,信号处理精度大大提高。因此可以说,频谱细化和频谱校正算法大大提高了信号处理的精度,将频谱分析技术运用于激光 LDV 中切实可行。

表 1 实验测得的多普勒频率及其误差

Table 1 Doppler frequency and error

Number	Velocity / (m/s)	Frequency / MHz			Error / %	
		Counting	FFT	Spectrum analysis	FFT	Spectrum analysis
1	0.395	0.733	0.728	0.7315	0.68	0.20
2	0.515	0.957	0.951	0.9555	0.63	0.16
3	0.675	1.253	1.260	1.2550	0.56	0.16
4	0.932	1.731	1.745	1.7365	0.81	0.32
5	1.083	2.012	1.994	2.0060	0.89	0.30

## 6 结 论

为了提高激光 LDV 的测量精度和分辨率,基于 LabView 和 Matlab 混合编程,提出并设计了 LMS 自适应滤波器,它不需要预先知道干扰噪声的统计特性,能在逐次迭代的过程中将滤波器的工作状态自适

应地调整到最佳,抑制噪声对激光多普勒信号的干扰。针对 FFT 获取信号频率精度不高的缺陷,对所得的频谱先作频谱细化,再作频谱校正。对理想正弦信号的仿真和实测多普勒信号的处理结果表明,LMS 自适应滤波技术对噪声的抑制作用很明显,经过滤波

后信号的信噪比大大提高。频谱细化技术可以提高激光多普勒信号的频谱分辨率,频谱校正技术可以准确地校正多普勒频率,使校正后的频率更加接近于真实值,减小了信号处理的误差;信号处理精度比直接进行FFT提高2~3倍。因此,在激光LDV中运用基于混合编程的高精度激光多普勒信号处理技术切实可行。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Yeh, H. Z. Cummings, Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **4**(10): 176~178
- 2 E. T. Brucee, C. D. Frank, E. Gary *et al.*. Laser Doppler velocimeter for velocity and length measurements of moving surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(1): 67~73
- 3 A. L. Duff, G. Plantier, J. C. Valiere *et al.*. Analog sensor design proposal for laser Doppler velocimetry[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2004, **4**(2): 257~261
- 4 He Yan, Shang Jianhua, Liu Dan *et al.*. Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 189~192  
贺岩,尚建华,刘丹等.用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 189~192
- 5 Zhang Haiyang, Zhao Changming, Jiang Qijun *et al.*. Laser detection on micro-Doppler effect in coherent ladar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1981~1985  
张海洋,赵长明,蒋奇君等.基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1981~1985
- 6 Shen Xiong. Laser Doppler Velocimetry and Its Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 38~39  
沈熊.激光多普勒技术及其应用[M].北京:清华大学出版社, 2004. 38~39
- 7 Sun Yusheng. The Technology and Application of Laser Doppler Measurement [M]. Shanghai: Press of Shanghai Science and Technology Literature, 1995. 9  
孙渝生.激光多普勒测量技术及其应用[M].上海:上海科学技术文献出版社, 1995. 9
- 8 Cheng Peiqing. Digital Signal Processing (2nd Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 172~177  
程佩青.数字信号处理教程(第二版)[M].北京:清华大学出版社, 2001. 172~177
- 9 L. E. Drain. The Laser Doppler Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 50  
L. E. Drain. 激光多普勒技术[M].北京:清华大学出版社, 1985. 50
- 10 Gao Jinzhan. Detection of Weak Signals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 292~301  
高晋占.微弱信号检测[M].北京:清华大学出版社, 2004. 292~301
- 11 Huang Fukan, Chen Jianwen, Lou Shengqiang. Modern Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 195~222  
皇甫堪,陈建文,楼生强.数字信号处理[M].北京:电子工业出版社, 2004. 195~222
- 12 Hu Hailong. Research on Signal Processing of High Accuracy in Laser Doppler Velocimeter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. 23~25  
胡海龙.高精度信号处理技术在激光多普勒测速中的应用研究[D].成都:电子科技大学, 2006. 23~25
- 13 Liu Changwen, Han Jingna, Liu Jie *et al.*. Investigation on frequency correction methods and its application in digital spectrum LDA processor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 642~646  
刘昌文,韩静娜,刘杰等.激光多普勒测速中的频谱校正及其应用[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 642~646
- 14 Zhou Jian, Huang Hua. Application of frequency spectrum refinement and correction technology in laser Doppler velocimeter[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(2): 144~151  
周健,黄华.频谱细化及频谱校正技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(2): 144~151
- 15 Zhou Jian, Long Xingwu, Song Rui *et al.*. Measuring the precision of laser Doppler velocimeter based on counting[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 434~436  
周健,龙兴武,宋锐等.基于计数法测量激光多普勒测速仪的测速精度[J]. *光学技术*, 2009, **35**(3): 434~436

栏目编辑:李文喆