

频谱细化及频谱校正技术在激光多普勒测速仪中的应用

周 健¹, 黄 华²

(1. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 南京军代局驻无锡地区军代室, 江苏 无锡 214035)

摘 要:提出了对多普勒信号先进行频谱细化,再进行频谱校正的方法,阐述了几种常见的离散频谱细化和频谱校正算法的基本原理,并运用它们对不同频率的理想正弦信号和实测的多普勒信号进行谱仿真和实测研究。理论分析和实验结果表明:频谱细化算法中 Goertzel 细化算法所需的运算量最少,计算速度最快;频谱校正算法中比值校正算法校正公式简单,运算量少,且校正精度较高;频谱细化和频谱校正技术大大提高了频谱分辨率,将其运用于频谱分析型激光多普勒测速仪中切实可行。

关键词:信号处理;激光多普勒;频谱细化;频谱校正

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Application of frequency spectrum refinement and correction technology in laser Doppler velocimeter

ZHOU Jian¹, HUANG Hua²

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Nanjing Army Agency Bureau Wuxi Office, Wuxi 214035, China)

Abstract: In this paper, frequency spectrum refinement and frequency spectrum correction method for Doppler signal was proposed separately. Basic principle of frequency spectrum refinement and frequency spectrum correction algorithm was expounded. Spectrum simulation of different frequency ideal sinusoidal signal and real-time Doppler signal were studied based on these theories. Theoretical analyses and experimental results demonstrated that, the Goertzel refinement algorithm has the least computing amount and the quickest computing speed; the ratio correction algorithm for frequency correction has simple correction formula, less computing amount and higher correction accuracy. Resolution of frequency spectrum can be improved by frequency spectrum refinement and correction technology, which is practical useful in frequency spectrum analyzing laser Doppler velocimeter.

Key words: signal processing; laser Doppler; frequency spectrum refinement; frequency spectrum correction

1 引 言

自从1964年 Yeh 等人证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流体速度,激光多普勒测速仪(LDV)就以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大、非接触测量等特点在航空、航天、机械、能源等领域得到快速的发展^[1-7]。目前多普勒信号处理的最常见的方法是快速傅里叶变换(FFT),主要是

因为这种方法具有很强的从噪声中提取信号的能力及能够接受间断信号等优点。然而如果直接将FFT结果的峰值谱对应的频率作为多普勒频率值,则存

基金项目:“十一五”预研项目资助。

作者简介:周 健(1983-),男,博士研究生,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail:wttzhoujian@163.com

收稿日期:2009-08-31;修订日期:2009-09-24

在精度低的问题。因为频率分辨率为 $\Delta f = f_s/N$, 其中 f_s 为采样频率, N 为采样点数(分析数据长度)。对于一个频率为 20 kHz 的理想正弦信号, 用 200 kHz 的频率采样 256 个点, 此时频率分辨率为 $\Delta f = 781.25$ Hz, 则由 FFT 得到的频率结果误差高达 4%, 显然不满足 LDV 的精度要求。而且直观上提高频率分辨率的两种方法都不可行: ①降低采样频率 f_s , 由于 LDV 常用于测量动态变化范围大的速度场, 要覆盖速度的整个动态变化范围, 不能减小 f_s ; ②增加进行 FFT 的数据长度 N , 同时增加了计算量, 导致延时增加, 实时性变差, 且消耗的系统资源增多。

因此, 必须考虑从软件上采用特殊的方法对 FFT 的结果进行修正以提高频率分辨率。为此, 文章详述了频谱细化及频谱校正的基本原理, 并分别对理想正弦信号和实验中的多普勒信号进行仿真和实测研究。

2 离散频谱细化的方法

频谱细化技术, 其实质就是在增加采样点数的基础上, 不计算每一个采样点的傅里叶变换值, 而是通过各种算法减少傅里叶变换的计算量, 也就是说虽然增加采样点数, 提高频率分辨率, 但其计算量减少, 系统的延时减小。

频谱细化的算法很多, 常见的有 Goertzel 细化算法、选带相位补偿细化算法及复调制谱细化算法等, 其中 Goertzel 细化算法所需的运算量最少, 计算速度最快。

2.1 三种常用的谱细化方法

2.1.1 Goertzel 细化算法的基本原理

Goertzel 细化算法的实质就是利用旋转因子序列 W_N^{-kn} 的周期性减少计算量^[8]。考虑到 $W_N^{-kn} = e^{(-j2\pi/N) \cdot (-Nk)} = 1$, 则:

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{r=0}^{N-1} x(r) W_N^{kr} = W_N^{-kN} \sum_{r=0}^{N-1} x(r) W_N^{kr} \\ &= \sum_{r=0}^{N-1} x(r) W_N^{-k(N-r)} \end{aligned} \quad (1)$$

采样序列 $x(n)$ 与序列 $W_N^{-kn}u(n)$ 的离散卷积为:

$$y_k(n) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x(n) W_N^{-k(n-r)} u(n-r) \quad (2)$$

其中, $u(n)$ 为阶跃序列, 其定义为 $u(n) = \begin{cases} 1 & (n \geq 0) \\ 0 & (n < 0) \end{cases}$ 。由式(1)和式(2)及当 $n < 0$ 和 $n \geq N$ 时 $x(n) = 0$ 的事实可知 $X(k) = y_k(n) |_{n=N}$, 即 $y_k(n)$ 可以看作是脉冲响应为 $W_N^{-kn}u(n)$ 的系统对有限长序列 $x(n)$ 的响应, 特别 $X(k)$ 就是 $n = N$ 时的输出值。

为进一步减少运算量, 研究系统的传递函数 $H_k(z)$ 得:

$$\begin{aligned} H_k(z) &= \frac{1}{1 - W_N^{-k}z^{-1}} \\ &= \frac{1 - W_N^kz^{-1}}{(1 - W_N^{-k}z^{-1})(1 - W_N^kz^{-1})} \\ &= \frac{1 - W_N^kz^{-1}}{1 - 2\cos(2\pi k/N)z^{-1} + z^{-2}} \end{aligned} \quad (3)$$

若输入为实数, 由于系数也是实数并且因子 -1 不必算作一次乘法, 所以实现该系统的极点只需每个样本作 1 次实数乘法。由于只需使该系统处于可以计算出 $y_k(n)$ 的状态, 所以实现系统函数的零点所要求的与 $-W_N^kz^{-1}$ 作复数乘法就不必在差分方程的每一步迭代中进行, 只须在第 N 次迭代后完成。因此, 总计算量是 $(N+2)$ 次实数乘法和 $(N+2)$ 次实数加法, 计算量大大减少。

2.1.2 选带相位补偿细化算法的基本原理

假设频谱细化倍数为 D , 则一次需采样 D_N 个数据点, 由于 FFT 的运算量与变换点数成几何倍数关系, 当细化倍数 D 较大时, 直接作 D_N 点 FFT 是不可能实现的。相位补偿细化算法的本质是将数据采集序列分成 D 段长度均为 N 的序列, 然后分别对这 D 段序列进行 N 点 FFT 以便得到其细化的频谱, 算法的数据处理流程如图 1 所示。

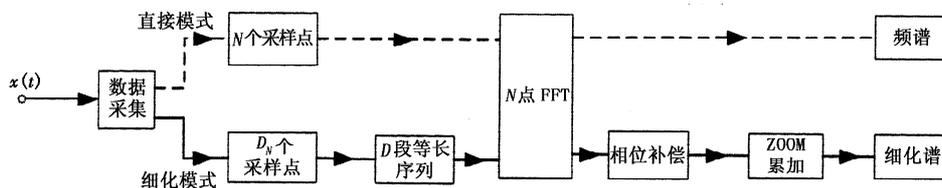


图 1 相位补偿算法数据计算流程图

Fig. 1 flowchart of computing with phase compensation refinement algorithm

2.1.3 复调制谱细化算法的基本原理^[9]

复调制谱细化算法,是基于复调制移频的高分辨率傅里叶分析方法。具体的作法如下:先根据需要确定谱细化的频率范围 $f_1 \sim f_2$,然后对采样序列 $x(n)$ 以 $e^{-j2\pi n f_e/f_s}$ 进行复调制,将复调制后的细化频率中心移至零频点,为了得到零频点附近的一部分

细化谱,可用选抽(重采样)的方法把采样频率降低至 f_s/D 。为了保证选抽后不发生频率混叠,在抽取前进行高通滤波。这里 $f_e = (f_1 + f_2)/2$ 为细化的频率中心, f_s 为采样频率, D 为细化倍数。

其数据处理的流程如图2所示。

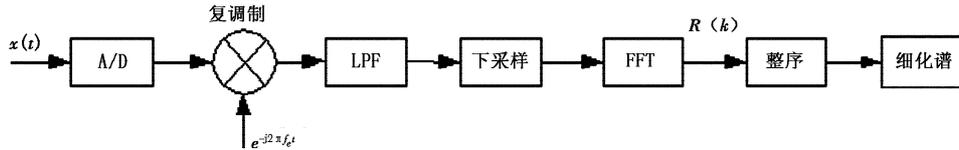


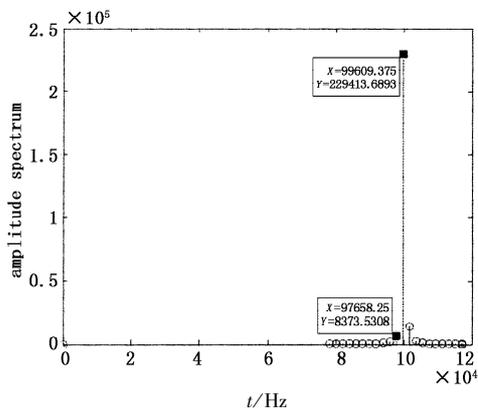
图2 复调制谱细化算法的数据处理流程图

Fig. 2 flowchart of signal processing with multiple modulation refinement algorithm

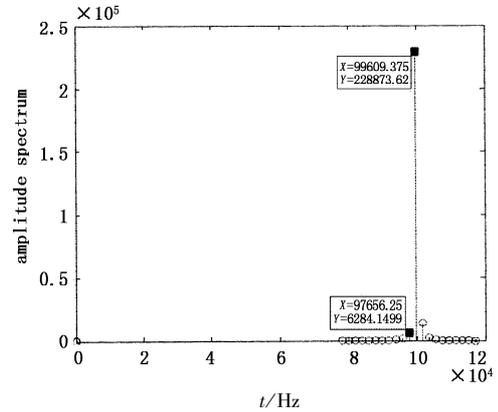
2.2 三种谱细化算法在 Matlab 上的功能仿真

用上述三种频谱细化的方法分别对频率为100 kHz,200 kHz 和 400 kHz 的理想正弦信号进行

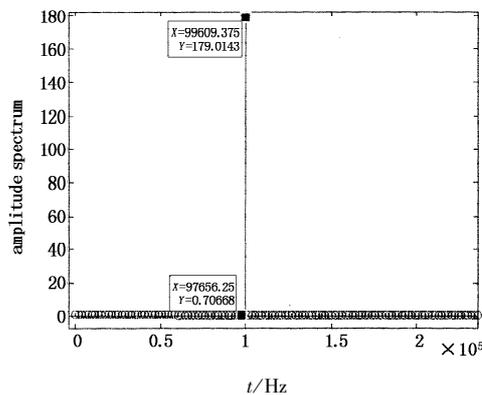
仿真计算,其中采样频率均为 2 M,采样点数均为 1024 点,细化倍数 $D = 4$,其结果与直接对 256 个采样点进行 FFT 比较,如图3~图5所示。



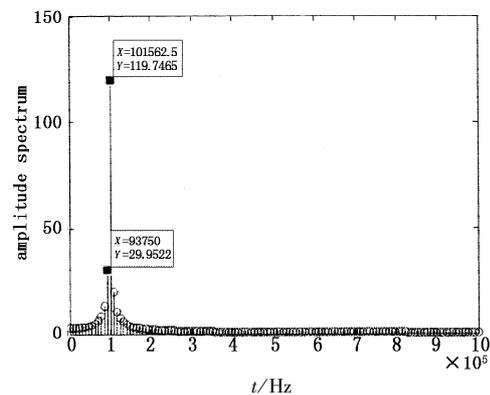
(a) Goertzel 细化算法
(a) Goertzel refinement algorithm



(b) 选带相位补偿细化算法
(b) phase compensation refinement algorithm



(c) 复调制谱细化算法
(c) multiple modulation refinement algorithm



(d) 直接对 256 个点进行 FFT
(d) fast Fourier transform with 256 point

图3 信号频率为 100 kHz 时三种细化算法及直接进行 FFT 的仿真结果

Fig. 3 result of three refinement algorithms and fast Fourier transform with 256 point when the frequency of the signal is 100 kHz

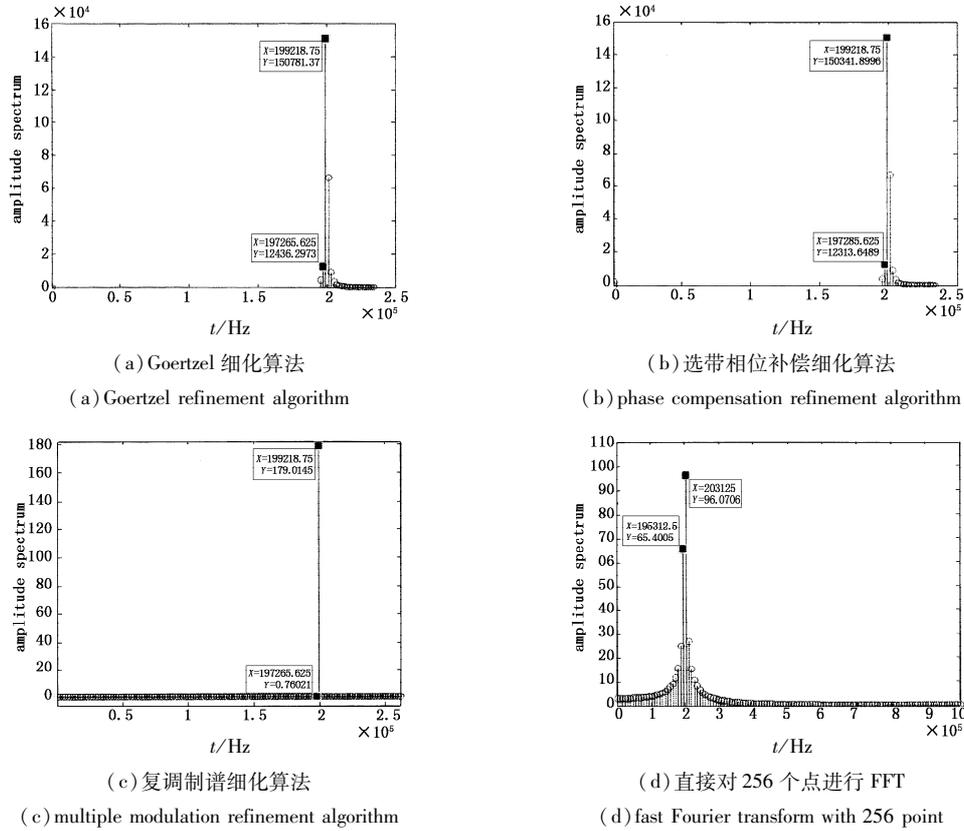


图 4 信号频率为 200 kHz 时三种细化算法及直接进行 FFT 的仿真结果

Fig. 4 result of three refinement algorithms and fast Fourier transform with 256 point when the frequency of the signal is 200 kHz

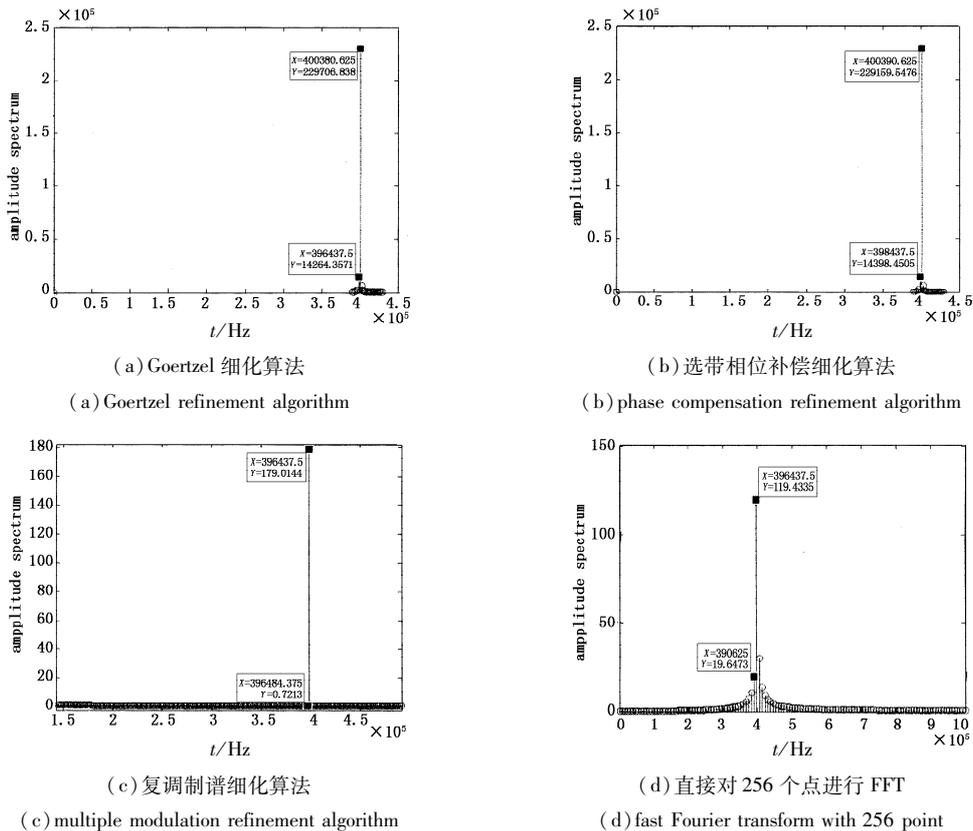


图 5 信号频率为 400 kHz 时三种细化算法及直接进行 FFT 的仿真结果

Fig. 5 result of three refinement algorithms and fast Fourier transform with 256 point when the frequency of the signal is 400 kHz

由图3、图4及图5中标出的相邻两点的间隔可知,对于100 kHz,200 kHz和400 kHz的正弦信号,直接进行256个点的FFT,频谱的分辨率为 $\Delta f = 7812.5$ Hz,用三种细化算法进行细化后,频谱的分辨率均为 $\Delta f = 1953.1$ Hz,三种细化算法均达到了细化频谱的目的,且细化后的频谱分辨率取决于算法中设定的细化倍数。另外,由图3、图4及图5均可看出,Goertzel细化算法和选带相位补偿细化算法可以有选择性的对某一段频谱进行细化,对这两种算法,图3中细化的频率范围为:78125 ~ 117187.5 Hz,图4中细化的频率范围为:195312.5 ~ 234375 Hz,图5中细化的频率范围为:390625 ~ 429687.5 Hz。也就是说,如果事先知道信号的频率在某个范围,那么利用Goertzel细化算法和选带相位补偿细化算法就可以只对所关心频段的频谱进行细化,这样大大减少了计算量,而复调制谱细化算法需要对整个频段进行细化。

3 离散频谱校正的方法

频谱校正的方法有很多种,考虑校正精度、速度、算法实现的难易程度以及与多普勒信号特点的结合,文章介绍能量重心校正、比值校正以及相位差校正三种较为实用的方法。其中比值法校正公式简单,运算量少,且校正精度较高。

3.1 三种校正方法的基本原理

3.1.1 能量重心校正法的基本原理

通过对窗函数能量特性的分析,发现窗谱主瓣函数的能量重心无穷逼近坐标原点。根据这一特点,利用窗函数频谱的主瓣图形及主瓣的谱线用重心法求出离散窗谱函数的能量重心坐标,该坐标就是频谱峰顶对应的主瓣中心,即校正出的准确频率^[10]。以hanning窗为例, Δk 的校正公式为:

$$\Delta k = \left(\sum_{i=-n}^n Y_i(k+i) / \sum_{i=-n}^n Y_i \right) - k \quad (4)$$

式中, Y 为功率谱第 i 条谱线幅值; k 为数字频率。

3.1.2 比值校正法的基本原理

这种方法利用归一化后差值为1的主瓣峰顶附近二条谱线的窗谱函数比值,建立一个以校正频率为变量的方程,解出校正频率,得以对频率进行修正。hanning窗的窗谱函数为:

$$f(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \frac{1}{2(1-x^2)} \quad (5)$$

对于任意一个 x ,其窗谱函数为 $f(x)$,其离散频谱为 y_k ,对于任一个 $(x+1)$,其窗谱函数为 $f(x+1)$,其离散频谱为 y_{k+1} ,显然有:

$$f(x)/f(x+1) = y_k/y_{k+1} \quad (6)$$

结合式(5)可得 $x = (y_k - 2y_{k+1})/(y_{k+1} - y_k)$,所得校正量为:

$$\Delta k = -x = (2y_{k+1} - y_k)/(y_{k+1} - y_k) \quad (7)$$

3.1.3 相位差校正法的基本原理

先对原始单频率成分信号采连续两段样本,然后对这两段信号分别进行作傅里叶变换,利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的准确频率^[11]。 Δk 的校正公式为:

$$\Delta k = (\theta_{k_1} - \theta_{k_2})/2\pi \quad (8)$$

其中, $\theta_{k_0}, \theta_{k_1}$ 分别表示两段信号傅里叶变换后 k 点处的相位。由于 $\theta_{k_0}, \theta_{k_1}$ 分别为两段信号傅里叶变换后 k 点处的相位,因而其均在 $(-\pi, \pi)$ 之间,两者之差在 $(-2\pi, 2\pi)$ 之间,因而需要对相位差进行调整,调整后的频谱校正量为:

$$\overline{\Delta k} = \begin{cases} \Delta k + 1 & (\Delta k < -0.5) \\ \Delta k - 1 & (\Delta k > 0.5) \end{cases} \quad (9)$$

3.2 三种校正方法对理想正弦信号进行频谱校正的仿真研究

用上述三种方法分别对频率为100 kHz,200 kHz和700 kHz的理想正弦信号进行仿真计算,其中采样频率均为2 MHz,FFT的点数均为256点,加hanning窗,其结果如图6~8所示。

由仿真结果可得如下结论:一方面,三种方法皆属于对短时快速傅里叶变换结果的校正,效果比较明显,使频率的变化范围可以小到一个频率分辨率范围之内,与常用的时频分析法和AR模型分析法相比计算量较小,实时计算容易实现,系统成本较低;另一方面,能量重心法校正精度相对较低,仅为 10^{-3} 量级,而比值法和相位差法校正的精度较高,可达 10^{-5} 量级。另外,由三种校正算法本身的特点可知,当信号中含有大量的噪声时,能量重心校正法校正的精度更差,相比而言,比值法校正的算法更简单,处理速度也更快,因此选它对实测多普勒信号进行研究。

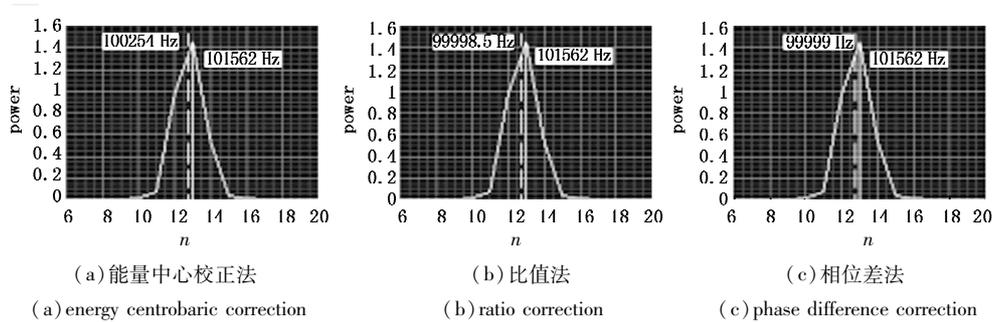


图6 频率为 100 kHz 的理想正弦信号时,三种方法频谱校正的结果
Fig.6 results of three methods with the frequency of signal is 100 kHz

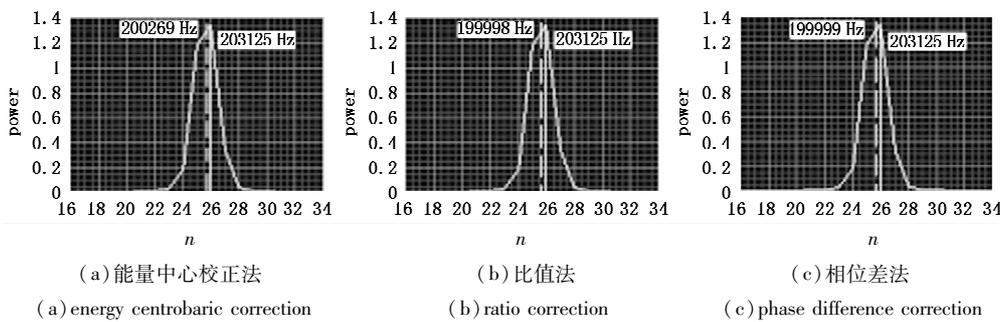


图7 频率为 200 kHz 的理想正弦信号时,三种方法频谱校正的结果
Fig.7 results of three methods with the frequency of signal is 200 kHz

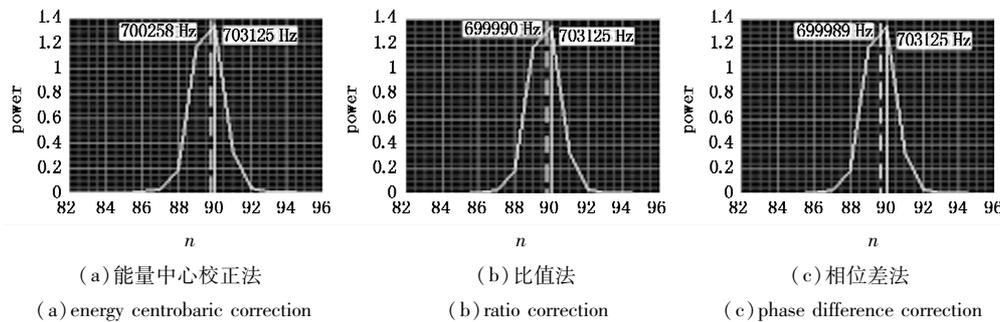


图8 频率为 700 kHz 的理想正弦信号时,三种方法频谱校正的结果
Fig.8 results of three methods with the frequency of signal is 700 kHz

4 两种离散频谱分析技术在激光多普勒测速仪中的应用

对被测物体的运动速度测量三次,得到三组实测的多普勒信号,如图9所示,其中采样点数为 $N =$

1024,采样频率为 $f_s = 10$ MHz。由图可以看出,三组信号的起始部分都有很大的衰减,这是由于此多普勒信号是经过高通滤波后所得的信号,滤波器的延时导致了信号起始部分的衰减。

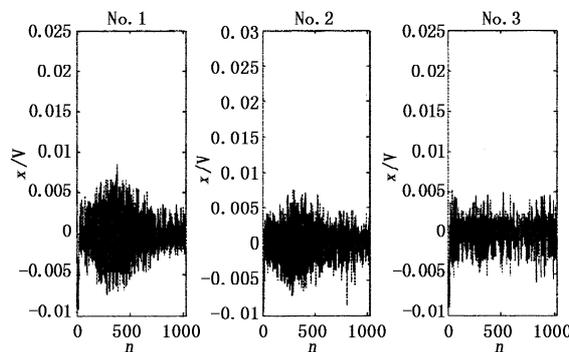


图9 三组实测的多普勒信号
Fig.9 three group of measuring doppler signal

三种离散频谱细化算法分别其频谱进行细化,并运用比值法频谱校正技术对细化后的频谱进行修正。

4.1 Goertzel 细化算法及比值法对实测信号的分析

运用 Goertzel 细化算法对第一组信号的频谱进行细化,其中细化倍数 $D = 2$,并运用比值法频谱校正技术对细化后的频谱进行修正,所得结果与直接对 512 个采样点进行 FFT 比较,如图 10 所示。

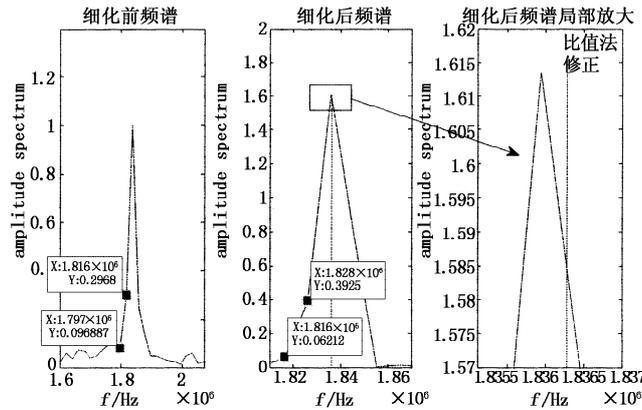


图 10 Goertzel 细化算法及比值法对频谱修正的结果

Fig. 10 result of spectrum correction with Goertzel refinement and ratio correction algorithm

4.2 选带相位补偿细化算法及比值法对实测信号的分析

谱进行细化,其中细化倍数 $D = 8$,并运用比值法频谱校正技术对细化后的频谱进行修正,所得结果与直接对 128 个采样点进行 FFT 比较,如图 11 所示。

运用选带相位补偿细化算法对第二组信号的频

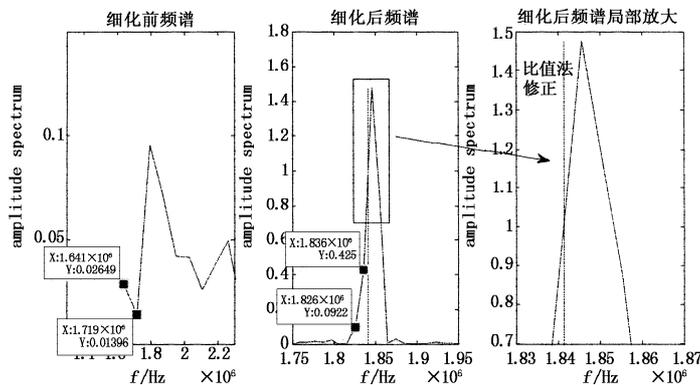


图 11 选带相位补偿细化算法及比值法对频谱修正的结果

Fig. 11 result of spectrum correction with phase compensation refinement and ratio correction algorithm

4.3 复调制谱细化算法及比值法对实测信号的分析

行细化,其中细化倍数 $D = 4$,并运用比值法频谱校正技术对细化后的频谱进行修正,所得结果与直接对 256 个采样点进行 FFT 比较,如图 12 所示。

运用复调制谱细化算法对第三组信号的频谱进

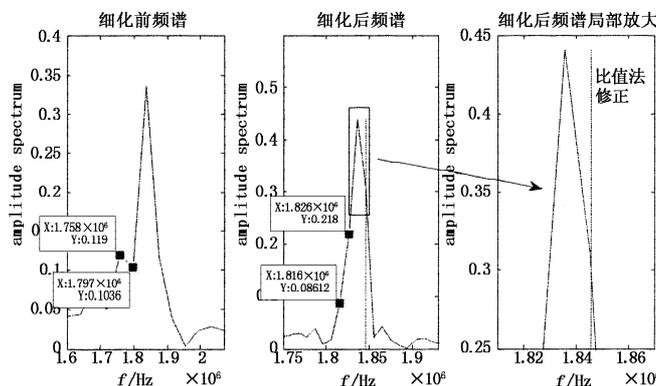


图 12 复调制谱细化算法及比值法对频谱修正的结果

Fig. 12 result of spectrum correction with multiple modulation refinement and ratio correction algorithm

一方面,由图 10,图 11 及图 12 中细化前、后的频谱图上标出的任取相邻两点的坐标可得:Goertzel 细化算法,细化前频谱的分辨率为 $\Delta f = 19532.25 \text{ Hz}$,细化后频谱的分辨率为 $\Delta f = 9765.625 \text{ Hz}$;选带相位补偿细化算法,细化前频谱的分辨率为 $\Delta f = 78125 \text{ Hz}$,细化后频谱的分辨率为 $\Delta f = 9765.625 \text{ Hz}$;复调制谱细化算法,细化前频谱的分辨率为 $\Delta f = 39062.5 \text{ Hz}$,细化后频谱的分辨率为 $\Delta f = 9765.625 \text{ Hz}$,三种细化算法获得很好的细化结果,频率分辨率的高低取决于细化倍数的大小;另一方面,在运用 LDV 进行测量的同时,运用计数法测量粒子的运动速度,并将其测量结果所对应的多普勒频率作为频率真值。第一组实测多普勒信号的频率真值为 1.8375 MHz ,校正前频率为 1.8358 MHz ,由图中细化后频谱的局部放大图可知,校正后频率为 1.8363 MHz ;第二组实测信号的频率真值为 1.8392 MHz ,校正前频率为 1.8486 MHz ,校正后频率为 1.8424 MHz ;第三组实测信号的频率真值为 1.8508 MHz ,校正前频率为 1.8394 MHz ,校正后频率为 1.8489 MHz 。显然,运用比值校正法对细化后的频谱进行修正,使多普勒频率值更接近真实值,进一步提高了频率分辨率。

5 结 论

针对激光多普勒测速仪分辨率不高的缺陷,文章提出先进行频谱细化,再进行频谱校正的方法。频谱细化算法中,三种算法都能获得较好的细化结果,但 Goertzel 细化算法所需的运算量最少,计算速度最快;频谱校正算法中,能量中心校正算法和比值校正算法校正公式简单,运算量少,而相位差校正算法需要进行两次 FFT,虽然校正精度高,但运算量大,此外比值校正算法的校正精度也较高。运用离散频谱细化和频谱校正算法,对理想正弦信号和实测多普勒信号进行谱修正,结果表明:在激光多普勒测速仪中采用频谱细化和频谱校正是切实可行的。

参考文献:

[1] Brayton D B, Kalb H T, Crosswy F L. Two-component dual · scatter laser Doppler velocimeter with frequency burst signal readout[J]. Appl Opt, 1973, 12(6): 1145.
 [2] Eric M Lawrence, Kevin E Speller, Duli Yu. Laser Doppler vibrometry for optical MEMS[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Italy: Ancona, 2002.

[3] 王辉林,陈志敏. 激光多普勒测速实验系统[J]. 激光与红外, 2009, 39(7): 721 - 723.
 Wang huilin, Chen zhimin System of Laser Doppler's Flow Velocity Measurement [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(7): 721 - 723. (in Chinese)
 [4] 廖强华,钟健,王冬梅. 应用激光多普勒技术测量 HGA 共振的研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(8): 768 - 771.
 Liao qianghua, Zhong jian, Wang dongmei. Research on the Resonance Test of HGA with Laser Doppler Technology[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(8): 768 - 771. (in Chinese)
 [5] 邓颖君,吕进,周文晖. 激光多普勒闪烁信号处理中的小波变换方法[J]. 激光与红外, 2002, 32(2): 85 - 87.
 Zheng yingjun, Lv jin, Zhou wenhui. Study on wavelet transformation applied to laser Doppler burst signal processing[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(2): 85 - 87. (in Chinese)
 [6] I Stec, S Hertegard, and J-E Juto. Laser Doppler measurements of the vocal fold blood micro-circulation[J]. Journal of Voice, 2007, 21(3): 345 - 354.
 [7] M A Gondal, J Mastromarino, Uwe K A Klein. Laser Doppler velocimeter for remote measurement of polluted water and aerosols discharges[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 1(38): 589 - 600.
 [8] 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.
 Hu hai-long. Research on signal processing of high accuracy in laser Doppler velocimeter[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 23 - 25. (in Chinese)
 [9] 唐小军. 实时信号处理 - 算法的实时性与算法 - 硬件映射[D]. 成都:电子科技大学, 2003: 6 - 9.
 Tang xiao-jun. Real time signal processing-performance and hardware mapping of algorithm[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2003: 6 - 9. (in Chinese)
 [10] 江利旗. 离散频谱分析技术及动态信号分析系统[D]. 重庆:重庆大学, 2000: 25 - 27.
 Jiang li-qi. Discrete spectrum analysis technique and the system of dynamic signal analysis[D]. Chongqing University, 2000: 25 - 27. (in Chinese)
 [11] 朱小勇,丁康. 离散频谱校正方法的综合比较[J]. 信号处理, 2001, 17(1): 91 - 97.
 Zhu xiao-yong, Ding kang. The synthetical comparison of correcting methods on discrete spectrum[J]. Signal Processor, 2001, 17(1): 91 - 97. (in Chinese)