

文章编号: 0258-7025(2003)07-0642-05

# 激光多普勒测速中的频谱校正及其应用

刘昌文, 韩静娜, 刘 杰, 路 绯

(天津大学机械工程学院汽车工程系, 天津 300072)

**摘要** 由于激光多普勒测速(LDA)系统的动态测试范围宽,信噪比低,单个散射粒子的渡越时间短,能采集到的信号长度有限,因此必须探索合适的频谱校正方法提高多普勒频率的精度来满足 LDA 的测量要求。将能量重心法、比值法、相位差法、频谱细化、频谱拟合等 5 种离散频谱校正方法应用于 LDA 信号处理中,通过仿真计算比较各种方法的优缺点,并选取比值法用于实时测量,取得了明显的效果。

**关键词** 激光技术;激光多普勒测速;信号处理;频谱校正

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Investigation on Frequency Correction Methods and Its Application in Digital Spectrum LDA Processor

LIU Chang-wen, HAN Jing-na, LIU Jie, LU Fei

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China)

**Abstract** With the development of digital signal processing technology, digital spectrum LDA processor are very interesting. Owing to low ratio of signal to noise, limited burst continuance and wide dynamic measurement range in LDA systems, spectrum correcting methods have to be studied in order to improve the precision of LDA processor. Energy centrobaric, ratio, zoom FFT, phase difference and spectrum simulation correcting methods are used in LDA signal processing. Through carrying out simulating calculation with three kinds of Doppler signals, ratio correcting method is picked out and applied in real-time measurement, and the satisfying result is achieved.

**Key words** laser technique; laser Doppler anemometry; signal processing; spectrum correction

### 1 引 言

激光多普勒测速(LDA)系统的光电信号经前置放大、带通滤波放大器和包络检测后,由 A/D 转换采集。对采集的信号进行补零、加窗<sup>[1]</sup>等预处理之后进行 FFT(快速傅里叶变换),求得频谱峰值位置,并将峰值对应的频率作为多普勒频率计算出被测速度值。这即是数字频谱分析型 LDA 信号处理器的基本原理。随着数字信号处理速度和数字存贮能力的进一步提高,该 LDA 信号处理技术跟踪速度变化和噪声适应的能力较其他 LDA 信号处理技术(如频谱跟踪技术、闪烁计数技术<sup>[2]</sup>等)的优势将越来越明显。但如果直接将 FFT 结果的峰值谱对

应的频率作为多普勒频率值,则存在精度低的问题。设采样频率为  $f_s$ ,采集到的分析数据长度为  $N$ ,则频率分辨率为  $\Delta f = (f_s/N)$ ,FFT 结果的峰值谱线号为  $k(k = 0 \sim N/2 - 1)$  时,对应的频率值为  $f = k \cdot f_s/N$ <sup>[1]</sup>。对于一个频率为 20 kHz 的理想正弦信号,用 200 kHz 的频率采集 64 点,由 FFT 得到的频率误差达到  $\pm 8\%$  左右,显然不能满足 LDA 的精度要求。提高频率分辨率的方法直观上有两种:1) 降低采样频率  $f_s$ ,但由于 LDA 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, $f_s$  不能减小;2) 增加进行 FFT 的数据长度  $N$ ,但在流场测量中单个散射粒子穿过测量体的时间短,可能

收稿日期:2002-09-18;收到修改稿日期:2003-01-23

基金项目:高等学校骨干教师资助计划和国家自然科学基金(No. 50076033)资助项目。

作者简介:刘昌文(1963—),男,四川省富顺人,天津大学机械工程学院教授,博士,主要从事激光测速技术和微机测控技术研究。E-mail:haning@eyou.com

采集到的数据长度受到限制,不具有普遍意义,而且增加了计算量,消耗的系统资源增多。因此必须考虑从软件上采用特殊方法对 FFT 的结果进行校正以提高频率分辨率。LDA 中多普勒频率单一,且只关心其位置,因此本文只讨论单频成分的频率校正。

## 2 离散频谱校正方法

以下校正方法皆以最简单的 LDA 信号<sup>[2]</sup>

$$y_i = \sin(2\pi \cdot 20000 \cdot i/200000)$$

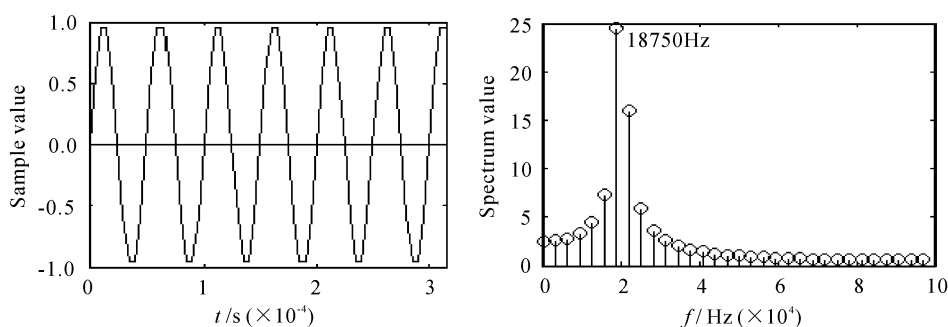


图 1 函数时域波形及 FFT 图

Fig. 1 Function wave-form and FFT

### 2.1 能量重心校正法

能量重心校正法<sup>[3,4]</sup>的基础是各种窗函数离散频谱的能量重心无穷逼近主瓣中心或在主瓣中心附近,以主瓣内功率谱值较大的几条谱线即可精确求得主瓣的中心坐标。 $\Delta k$  的校正公式为

$$\Delta k = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_{k+i}(k+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_{k+i}} - k \quad (3)$$

其中  $Y_i$  为功率谱第  $i$  条谱线幅值,  $n$  取 2, 加汉宁 (Hanning) 窗后对图 1 信号进行校正, 求得  $\Delta k$  为 0.3995, 代入式 (2) 得校正频率为 19.998 kHz, 如图 2 所示。

这种方法不依赖于窗函数, 算法简单, 但校正精度与窗函数 (加汉宁窗时具有较高的校正精度, 矩形窗谱校正精度较低) 和点数 (点数越多校正精度越高) 有关。

### 2.2 比值校正法

比值校正法<sup>[5,6]</sup>是利用幅值谱主瓣内谱线的重心求出峰顶的坐标, 得到准确频率。不同窗函数的主瓣形状不同, 校正公式也就不同。多普勒信号常采用加汉宁窗处理, 加汉宁窗时的修正量  $\Delta k$  为

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

即频率为 20 kHz, 用 200 kHz 的采样频率采集 64 点所得的序列为例, 进行分析, 其时域波形及 FFT 结果如图 1 所示, 峰值谱线号为 6, 对应的频率为 18.75 kHz, 与 20 kHz 有较大误差。为精确求取信号的频率, 需要对峰值谱线  $k$  进行修正, 设修正量为  $\Delta k$ , 则修正后的频率校正公式为

$$f_R = (k + \Delta k) f_s / N \quad (2)$$

其中  $f_R$  为校正后的频率值。

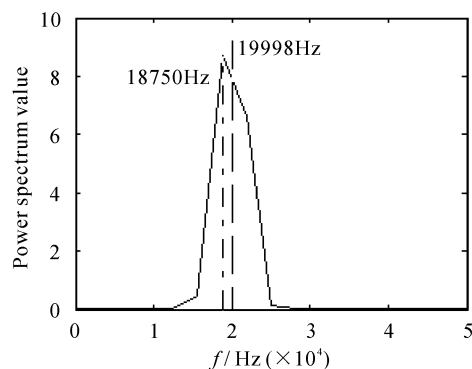


图 2 能量重心法校正结果

Fig. 2 Corrected frequency with energy centrobaric method

$$\Delta k = \begin{cases} \frac{2y_{k+1} - y_k}{y_k + y_{k+1}} & (y_{k+1} \geq y_{k-1}) \\ \frac{y_k - 2y_{k-1}}{y_k + y_{k-1}} & (y_{k+1} < y_{k-1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $y_k$  为幅值谱第  $k$  条谱线幅值。对图 1 所示信号, 求出  $\Delta k$  为 0.3968, 校正后的频率为 19.990 kHz, 如图 3 所示。

比值校正法精度高, 算法简单, 计算速度快, 对于采用加汉宁窗的多普勒信号, 其  $\Delta k$  的校正公式

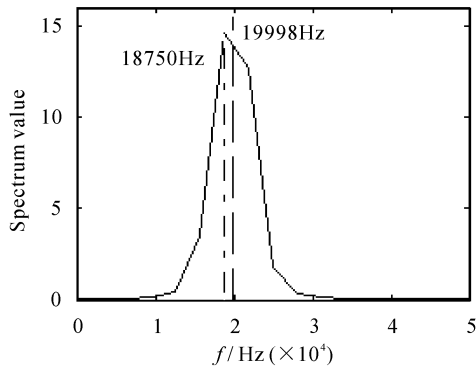


图 3 比值法校正结果

Fig. 3 Corrected frequency with ratio method

比较简单。

### 2.3 相位差校正法

相位差校正法<sup>[7]</sup>是利用两段样本峰值谱线对应的位相之差求出谱峰处的准确频率。两段样本有不同的获得方法,适用于多普勒信号的是:对原始信号采集  $N$  点,得到第一段样本,然后将第一段样本的前  $N/2$  点平移  $N/4$  点后将前后  $N/4$  点置零,构造出第二段样本。对两段样本加相同的窗函数,进行 FFT 变换后得到各自的峰值谱线号为  $k$ ,对应的相位为  $\theta_{k_0}, \theta_{k_1}$ ,则

$$\overline{\Delta k} = \frac{\theta_{k_0} - \theta_{k_1}}{\pi/2} \quad (5)$$

用下式对  $\overline{\Delta k}$  调整,直至所得  $\Delta k$  在  $-0.5$  和  $0.5$  之间

$$\Delta k = \begin{cases} \overline{\Delta k} + 1 & (\overline{\Delta k} < -0.5) \\ \overline{\Delta k} - 1 & (\overline{\Delta k} > 0.5) \end{cases} \quad (6)$$

用相位差校正法对式(1)校正,所得  $\Delta k$  为  $0.4074$ ,校正后的频率为  $20.023$  kHz,如图 4 所示。

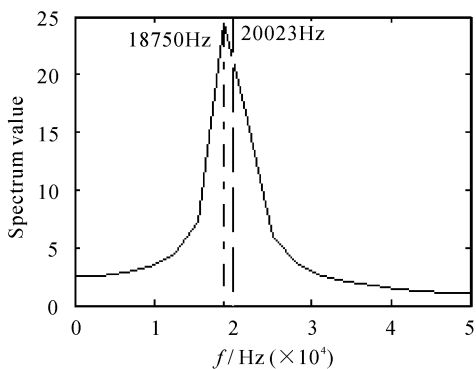


图 4 相位差法校正结果

Fig. 4 Corrected frequency with phase difference method

至今为止所有的讨论都是假设两样本的峰值对应着同一谱线号(均为  $k$ ),但是在 LDA 实际研究中发现由于噪声干扰,A/D 分辨率低等因素的影响,可能会造成两样本的峰值谱线号并不相同,分别为  $k_1, k_2$ ,这时如果直接用式(6)进行计算,常得到错误结果。此时必须作如下特殊处理:假设  $k_1 < k_2$ ,根据能量重心分布规则,校正后应该满足  $k_1 \leq (k + \Delta k) \leq k_2$ ,

如果令  $k = k_1$ ,则:  $\Delta k > 0$  时不需要修正,  $\Delta k < 0$  时令  $\Delta k = -\Delta k$ ;

如果令  $k = k_2$ ,则:  $\Delta k < 0$  时不需要修正,  $\Delta k > 0$  时令  $\Delta k = -\Delta k$ 。

经实测检验,本处理收到了满意的效果。

这种方法的校正精度高,算法比较简单。对于一个包络中往往只含有一个频率成分的多普勒信号,该方法具有很好的实用性。

### 2.4 FFT+离散傅里叶变换(DFT)谱连续细化

在用 FFT 做出全景谱的前提下,对某些感兴趣的范围用连续的傅立叶变换(FT)对谱进行计算<sup>[8]</sup>,得到此范围内的连续频域曲线,再求出峰值处的频率。用这种方法对式(1)在  $18 \sim 22$  kHz 之间的频率进行计算,频率分辨率取为  $20$  Hz,得到谱峰处的频率为  $20$  kHz,见图 5。这种方法在不增加采样数据长度的前提下,可以根据需要的频率分辨率人为地设定所需要的谱线条数,精度能达到很高,但是实时性差,计算速度比前 3 种方法慢很多。

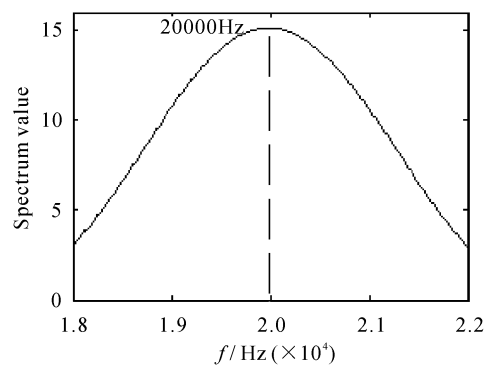


图 5 频谱细化结果

Fig. 5 Corrected frequency with zoom FFT method

### 2.5 频谱拟合

用 LDA 信号处理器采集数据,相当于对信号加矩形窗,矩形窗频谱的主瓣函数为 sinc 函数。对采集的数据进行 FFT 之后,得到的离散频谱用 sinc 曲线去拟合<sup>[9]</sup>,用最小二乘法得到最大幅值对应的

频率,即可得到所求的结果。式(1)信号用此法校正所得频率值为 19.45 kHz。这种方法的运行速度最慢,且对于加窗后复杂的主瓣函数求解比较困难,校正精度也不是很高。

### 3 多普勒信号频率校正的仿真研究

用上述 5 种校正方法分别对 3 种形式的多普勒信号<sup>[2]</sup>进行仿真计算,FFT 点数均为 64,所得结果列于表 1。除理想等幅信号如图 1 所示外,其他信

号均如图 6 所示。图 6(b)和(d)为多普勒信号处理器采集 4 bit A/D 转换所得,其余信号均为计算机模拟结果。模拟噪声信号噪声的最大幅值为 2.8。

分析以上仿真数据可以得到如下结论:

1) 5 种频率校正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的范围之内,与常用的时间-频率分析法和 A-R 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<sup>[10]</sup>。

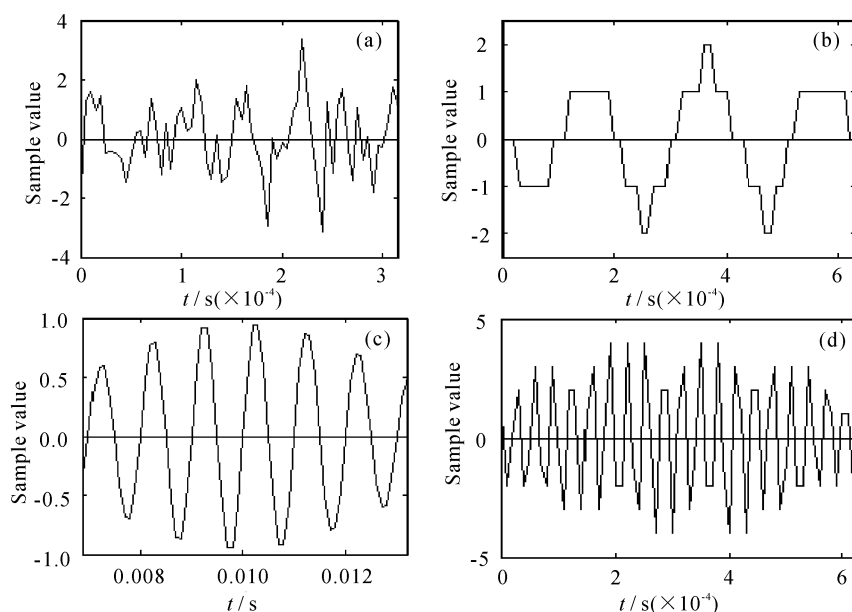


图 6 仿真计算的各种多普勒信号

(a) 模拟含噪声的多普勒信号;(b) 采集的连续等幅信号;(c) 模拟包络信号;(d) 采集的包络信号

Fig. 6 All kinds of Doppler signals for simulating calculation

(a) simulation signal with noise; (b) collected successive signal; (c) simulation burst signal; (d) collected burst signal

表 1 5 种校正方法的精度比较

Table 1 Precision comparison of five correction methods

Type of signal	Ideal successive signal	Simulation signal with noise	Collected successive signal	Simulation burst signal	Collected burst signal
Theoretical value/Hz	20000	20000	~4800	1000	~31000
No correction value/Hz	18750	18750	4687.5	937.5	31250
Energy centrobaric/Hz	19998	19154	4690.6	999.96	31188
Ratio/Hz	19990	19972	4761.2	1001.4	31128
Phase difference/Hz	20023	20107	4786.7	996.9753	31173
Zoom FFT/Hz	20000	20200	4720.0	1000	31180
Spectral simulation/Hz	19450	19468	4707.2	990.2	31213

2) 能量重心法对于理想信号的校正精度较高,而对于含有噪声的多普勒信号的校正精度较差;FFT+DFT 方法对于理想信号的校正只要细化的

谱线条数足够多就可以几乎没有误差,而对混有噪声的多普勒信号的校正也能满足精度要求,但速度较慢;频谱拟合的校正精度基本也可以满足要求,但

因它涉及求导和解方程组的问题,计算速度最慢。

3) 比值法和相位差法都有较高的校正精度,一般小于1%,处理速度也比较快,特别是比值法最为简单,处理速度也最快,选它作为频谱分析型 LDA 信号处理器的校正方法,用于实测研究。

#### 4 比值校正法的应用

在频谱分析型 LDA 信号处理器上,进行转盘原理性试验,用比值法进行频率校正。该原理性试验以直流电机带动的运动的有机玻璃表面的运动速度为被测对象,通过人为地较大幅度地调节直流电机的转速来改变转盘的转速,得到速度的变化曲线。图 7 为没有使用任何频率校正方法,将采样序列分段进行 FFT 分析后,根据每一段谱线峰值对应的频率值绘制的速度变化曲线。由图 7 可见曲线上点和

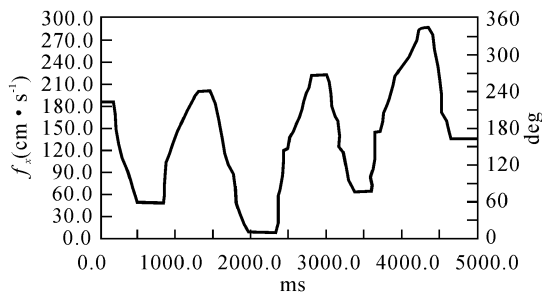


图 7 未使用频率校正测得的速度变化曲线

Fig. 7 Velocity curve without correcting frequency

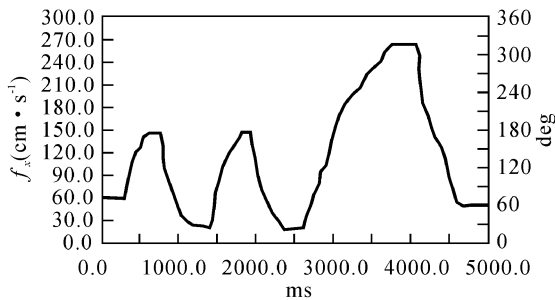


图 8 使用比值法校正后测得的速度变化曲线

Fig. 8 Corrected velocity curve with ratio method

点的速度差只能为一个频率分辨率对应的速度差的整数倍,阶跃特性明显。图 8 是相同采样频率,相同分析点数,利用比值法校正后的结果。采用比值校正法后,频率分辨率提高,阶跃特性消失,速度曲线变得光滑。因此在数字频谱分析型 LDA 信号处理器中采用频率校正方法是必须并完全可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 Wang Shiyi. Digital Signal Processing [M]. Beijing: Press of Beijing University of Polytechnic, 1997 (in Chinese)
- 2 L. E. Drain. Laser Doppler Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 146 ~ 168 (in Chinese)
- 3 C. Offellic, D. Petri. A frequency-domain procedure for accurate real-time signal parameter measurement [J]. *IEEE J. Trans. Instrum. Measurement*, 1990, **39** (2):363~368
- 4 Ding Kang, Jiang Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum [J]. *Journal of Vibration Engineering (振动工程学报)*, 2001, **14**(3):354~358 (in Chinese)
- 5 Xie Ming, Ding Kang. A new rectifying technique of discrete spectrum analysis [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) (重庆大学学报(自然科学版))*, 1995, **18**(2):47~54 (in Chinese)
- 6 Xie Ming, Ding Kang. Rectifying technique of spectrum analysis [J]. *Journal of Vibration Engineering (振动工程学报)*, 1994, **7**(2):172~179 (in Chinese)
- 7 Xie Ming, Zhang Xiaofei, Ding Kang. A phase difference correction method for phase and frequency correction in spectral analysis [J]. *Journal of Vibration Engineering (振动工程学报)*, 1999, **12**(4):454~459 (in Chinese)
- 8 Liu Jinming, Ying Huaijiao. Zoom FFT spectrum by Fourier transform [J]. *Journal of Vibration Engineering (振动工程学报)*, 1995, **8**(2):162~166 (in Chinese)
- 9 Zhou Jinping, Wang Ran, Wu Bin. MATLAB6 Practise and Improve [M]. Beijing: Chinese Electricity Press, 2002. 110~113 (in Chinese)
- 10 Wang Yuanyuan, Peter J. Fish. Comparison research of Doppler signal analysis techniques [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science) (复旦大学学报(自然科学版))*, 1996, **35**(1):53~61 (in Chinese)