

文章编号 1004-924X(2002)02-0130-05

# 一种基于 PC 微机的新型激光多普勒信号处理器研究

刘昌文, 路 绯, 刘 杰

(天津大学 机械工程学院汽车工程系, 天津 300072)

**摘要:**激光多普勒测速(LDA)已成为科学研究中测量固体表面运动速度和复杂流场流动速度的一种强有力的手段,受到普遍的重视。而多普勒信号处理器则在整套测速系统中起着非常关键的作用。基于PC机的LDA信号处理器采用平均周期图法对LDA光电信号进行分析,并利用补零、加窗、频率放大等信号处理措施大大提高了整套系统的噪声适应能力,同时简化了系统的硬件结构。随着PC机的迅速发展,这种信号处理方法必然有着越来越好的发展前景。

**关键词:**激光多普勒测速;平均周期图法;多普勒信号处理

中图分类号:TN247 文献标识码:A

## 1 引言

激光多普勒测速(简称LDA)是利用流体中或固体表面的散射粒子对入射激光产生散射,通过探测散射光所携带的多普勒频移,测得流体或固体表面的运动速度<sup>[1]</sup>。由于LDA技术具有不干扰被测对象、不需标定、空间分辨率高、动态响应快、线性度好等特点,已广泛应用于机械、动力、航空、水利、医学等研究领域。但是由于有效散射光很弱,而且受杂散光、散射粒子尺寸及位置分布随机特性等的影响,使得LDA系统的光电信号的信噪比较低而且经常出现间断的情况。因此采用何种信号处理器从大量噪声中精确地提取出多普勒频移将对整套LDA系统的性能具有很大的影响。

目前,多普勒信号处理器主要向着数字信号处理方向发展,其主要特点是具有较强的噪声适应能力<sup>[2]</sup>,但是为了提高其响应速度多考虑使用专用的数字处理芯片。本文所讨论的LDA信号处理器是以通用PC机为信号处理单元,采用平

均周期图法<sup>[3]</sup>对每个多普勒波群完成直接的频谱分析,从而求得多普勒信号的频率量,并利用补零、加窗、频率放大等信号处理方法提高信号的分析质量,使得本方法具有较高的分析速度和较强的噪声适应能力。随着现代PC微机处理速度和性能的日益提高,必然可以加快整套信号处理器的动态响应速度,大大缓解了由于软件分析带来的信号处理速度和分析精度之间的矛盾,使其应用前景越来越好。

## 2 硬件电路构成

本套信号处理器的基本工作原理是通过信号采集与软件处理找到光电信号中所包含的多普勒频移值 $f_D$ 。由于多普勒频移值 $f_D$ 与被测速度 $V$ 之间存在着已知的线性关系,因而可以获得被测流场的流动特征。

整套LDA的结构如图1所示,信号处理硬件主要包括信号预处理和高速数据采集两部分,下面分别予以讨论。

收稿日期:2001-08-21;修订日期:2002-01-27

基金项目:本研究得到了“高等学校骨干教师资助计划”和“国家自然科学基金”资助(No.50076033)

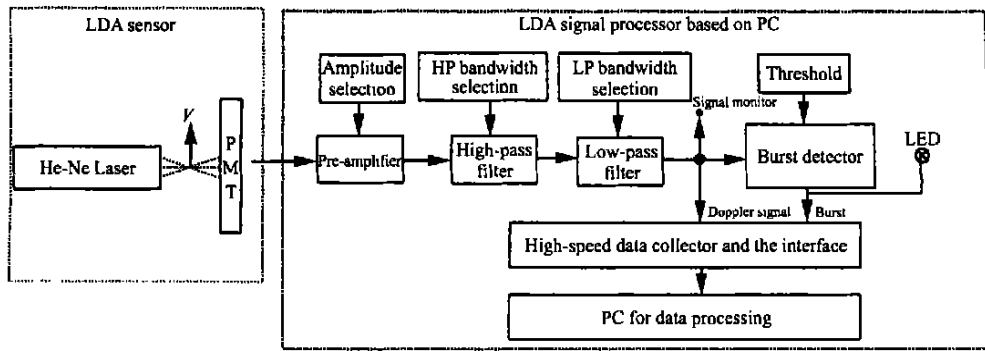


图 1 基于 PC 机的 LDA 信号处理框图

Fig. 1 The structure of LDA with the signal processor based on PC.

2.1 信号预处理(包括前置放大器, 高通滤波器, 低通滤波器, 包络探测器)

如前所述, LDA 光电探测器输出信号中除了多普勒频率外还包含各种噪声, 利用前置放大器和高低通滤波器可以从众多干扰中选出有效的多普勒信号。如果有合适的散射粒子通过测量点, 滤波放大后的信号将出现较大强度的闪烁, 称之为包络(Burst)。只有包络出现时, 对光电信号分析才有意义。为了探测出包络的出现以启动高速数据采集部分, 特设定了不同的三个阈值电压  $V_+$ 、 $V_-$ 、 $0$  (阈值电压由操作者根据信号的强弱进行设置) 对信号分别进行整形, 得到三个方波信号  $S_+$ 、 $S_-$ 、 $S_z$ 。将  $S_z$  与  $S_+$ 、 $S_-$  按如下的方式处理可以产生包络信号。如果多普勒信号顺序通过  $V_+ \rightarrow 0 \rightarrow V_- \rightarrow 0$ , 则认为信号是在包络中即包络有效; 如果不按照此顺序变化, 则认为信号不在包络

中, 从而是一个不被系统处理的信号即包络无效。包络从无效到有效变化时才启动高速数据采集电路, 对滤波放大后的多普勒信号进行采样。

2.2 高速数据采集电路

该部分电路主要由 A/D 转换器、数据缓存 RAM、自动地址指针计数器、包络起始时刻记录器和逻辑控制电路组成。主要完成对多普勒信号电压值的离散化和记录包络起始的时刻, 并将其送入 PC 机进行分析处理, 从而获得速度信息, 结构框图如图 2 所示。

A/D 转换器采用 Intersil 公司的具有 25MHz 最大采样频率的 4 位 A/D 转换器——CA3304, 它由采样时钟电路触发, 自动对多普勒信号电压值进行采集, 并将结果送入数据缓存器中。采用双极性工作模式得到的多普勒信号如图 3、4 的 (a) 和 (b) 所示。

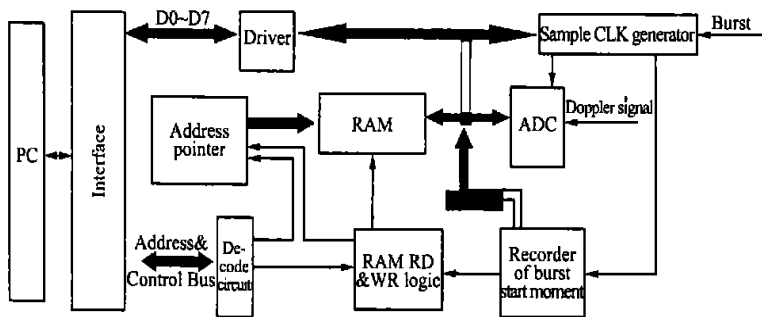


图 2 高速采集电路硬件结构图

Fig. 2 The hardware block diagram of high\_speed data acquisition.

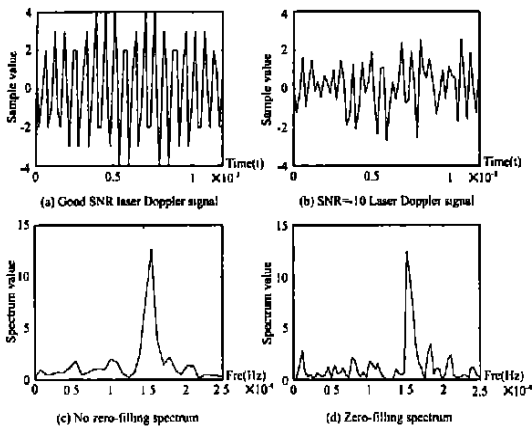


图 3 补零后的效果

Fig. 3 Contrast between zero\_filling and no filling.

被测速度较大时,  $f_D$  较高, 对应的采样频率也必须很高, 以至于不能直接将采样值送入 PC 机, 为此设置了数据缓存器。数据缓存 RAM 由 2 片 62256 构成, 总容量为 64KB。每次实际使用的存储区大小也可以人为设定, 以适应不同的需要。两片 RAM 交替工作, 可使数据采集与 CPU 信号处理并行进行, 以保证不丢失速度信息。

自动地址指针计数器提供 62256 的 15 位读写地址, 由 4 片 74LS393 构成。

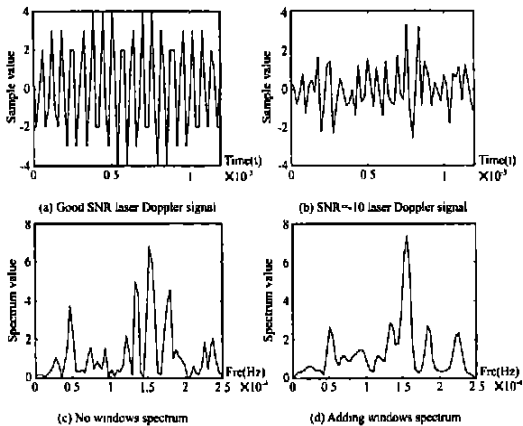


图 4 加窗后的效果

Fig. 4 Contrast between adding windows and no windows.

如前言所述, 散射粒子随机出现使得多普勒信号随机间断, 为了描述流速的时间变化特性, 必须记录散射粒子出现即包络出现的时刻, 为此设置了包络起始时刻记录电路。该电路以一个 16 位计数器为主体构成, 自动对设定的时钟脉冲电

路进行计数。每当包络从无效变换到有效时, 在有效 A/D 转换之前, 包络起始时刻记录电路立即将 2 个字节的表示包含起始时刻的计数器值送入 RAM 中。为了能与多普勒电压的 4bit 采样值区分开, 在起始时刻值之后还将自动加入两个 OFFH。包络起始时刻值记录完毕后立即启动 A/D 转换电路采集多普勒信号。

采样时钟电路提供硬件电路中各部分使用的时钟信号。通过控制时钟频率可以改变采样频率, 适应不同范围的  $f_D$  的测量需要。

逻辑控制电路控制 A/D 转换的启停、包络起始时间记录、地址指针的增加和清零, 产生 62256 的读写时序等等。

高速数据采集部分及其接口电路插入 PC 机扩展槽, PC 机作为系统的主控设备, 用于数据采集部分的工作参数设定, 发送采样的启停信号, 并从存储器中读取采样结果, 完成信号分析, 进而获得整个流场的流动信息。

### 3 信号处理软件的基本原理

来自于 LDA 光学探头的光电信号经过滤波放大后, 由高速数据采集部分离散化并送入 PC 机, PC 机对其频谱进行分析, 将最强成分作为多普勒频率用于计算速度值。由于激光测速仪光学系统得到的光电信号比较弱, 而且包含很多噪声, 必须采取措施减小噪声的影响。本文采用平均周期图法<sup>[3]</sup>对信号进行处理, 利用 FFT 变换直接对信号进行频谱分析, 进而加快了信号的分析处理速度; 除此以外还通过补零、加窗、频率放大等措施减小噪声干扰, 从而准确地提取出多普勒频率值。

在对多普勒信号的采样值进行谱估计之前, 需要进行以下处理:

#### 3.1 补零<sup>[4-5]</sup>

由于散射粒子穿过 LDA 测量体积的时间, 也就是一个包络的持续时间是随机的, 因此一个包络中得到的多普勒信号的采集点数也是随机的, 一般不是 2 的整数次幂, 需要通过补零才能进行 FFT 变换。同时补零还可以对不补零的谱线起到插值作用, 使其离散谱线的包络线逐渐接近连续频率的周期图, 对离散谱线的模糊不定性有改善。受到噪声干扰使得反映真实多普勒频率的谱

线可能被噪声所淹没, 在信号分析中可能会碰到两个峰值相近的谱线。这时很难分清两个谱线中到底是其中一个谱线对应的频率是信号的真实频率, 还是两个谱线中间还另有峰值谱线。通过补零可以解决这一问题, 准确地找到被分析信号的频率值。如图 3(d) 所示, 将采样电路采集到的多普勒信号离散值进行频谱分析, 可以看出补零之后谱线细节表现得很明显, 谱线峰值所对应的频率值为 15.625KHz。

### 3.2 加窗<sup>[5]</sup>

在进行功率谱估计时, 数据加窗是不可避免的。根据采样定律, 将多普勒信号离散化之后, 无形中已经将随机序列与矩形窗相乘, 从而造成了“谱泄漏”现象, 导致谱的模糊与失真。具体到多普勒信号中“谱泄漏”就是指由噪声引起的谱线峰值(即旁瓣)会淹没信号本身的频率谱线(即主瓣), 其后果就是使得分析软件误认为噪声信号的峰值所对应的频率值为被测信号的频率值, 影响整个信号处理器的性能。非均匀窗的使用, 可以缓解旁瓣泄漏, 减小噪声谱线对多普勒频率值的影响, 但付出的代价是窗变换主瓣的加宽, 因而谱分辨率降低。谱分辨率降低的直接体现就是相邻谱线的间距变大, 使得被测多普勒信号的峰值频率值很难找准。因此应该折衷考虑选取合适的窗函数, 我们将窗函数的长度取为采样点数的  $1/2$ <sup>[5]</sup>。从图 4(d) 可以看出, 加窗之后确实可以明显的抑制了旁瓣的影响, 并且提高了谱线的峰值。

在将原序列进行补零、加窗之后, 就可以进行平均周期图法运算了。平均周期图法的机理是: 从离散化的序列中提取出信号的频率特性。它通过 FFT 变换得到信号的频谱值, 并比较各点的频谱值, 谱线峰值处的频率值就为信号的频率值。平均周期图法是利用下式进行谱估计运算:

$$S_x^N(e^{jw}) = \frac{1}{N} |X(e^{jw})|^2, \quad (1)$$

其中  $|X(e^{jw})|$  为采样点经过快速傅立叶变换后的幅值谱。

### 3.3 提高运算速度的一种途径: 频率放大<sup>[6]</sup>

LDA 仪器常用于复杂流动的测量, 为了得到速场的变化特性, 要求信号处理器的每一个量程

必须有大于 10:1 的动态测量范围, 那么高速采集部分的采样频率将至少为这个量程可测最低频率的 20 倍, 这会造成对低频信号进行分析时, 信号采集点数的增多, 使运算量加大。我们通过频率放大的方法就可以有效地减小运算量。具体方法如图 5 所示: 首先利用 (2) 式将频段下移  $f_0$  ( $f_0$  一般取为谱线峰值所对应的频率值), 并用反混叠滤波消除可能出现的频率混叠效应。

$$v_{re}(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \operatorname{Re}[x(n-k)e^{-j2\pi n f_0 / f_s}], \quad (2)$$

式中  $h(k)$  为抗混叠滤波器,  $x(n)$  为原序列,  $v_{re}(n)$  为原序列实部的处理结果(虚部的处理方法相同)。

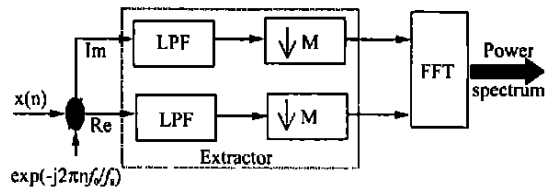


图 5 频率放大原理图

Fig. 5 The schematic diagram of zooming. (LPF: anti-overlapped filter)

然后通过式 (3) 实现降采样, 以减少冗余的数据点。

$$\begin{aligned} y'(m) &= v_e(m) \times p(m) \\ &= v_e(m) \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(m - Mi), \end{aligned} \quad (3)$$

最后将  $y'(m)$  进行频谱分析得到原序列的频率特性。

## 4 实验结果

利用本文所讨论的硬件电路及分析软件实际测试得到的多普勒频率变化曲线如图 6 所示, 其变化频率约为 800Hz。由实测结果可以看出整套设备具有较好的跟随速度变化的能力。

## 5 结 论

LDA 光电信号经过滤波放大等预处理后,由高速数据采集卡采集到微机;微机采用直接 FFT 变换可得到多普勒频率值,进而计算出运动速度大小。在硬件上增加数据缓存和包络起始时刻记录等电路以及在软件中使用补零、加窗和频率放大等措施,提高了信号处理器的噪声适应能力和跟踪速度变化的能力。由于整套信号处理器基于 PC 机工作,主要以软件分析实现多普勒频率的提取,其硬件结构可大为简化。随着 PC 机处理速度的提高,本文提出的信号处理方法的精度和跟踪速度变化的能力也将进一步提高;由于多普勒电压采集与微机数据分析并行进行,随着 PC 机存储能力的提高,能存储的暂时来不及分析的数据量可大大增加,本信号处理方法的测量范围和跟踪速度变化的能力也将随之进一步提高。总之,随着 PC 机技术的发展,基于 PC 机的 LDA 信号处理器具有很好的应用前景。

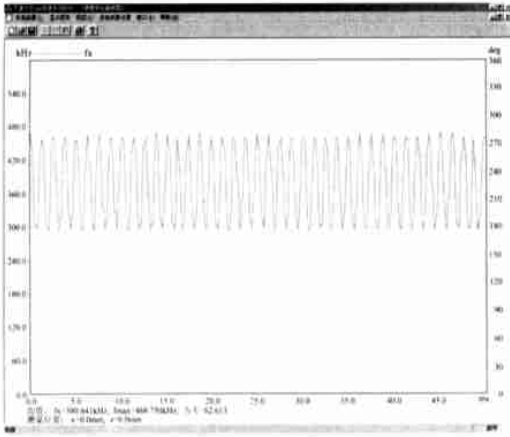


图 6 实测的多普勒频率曲线( $f_D$  的变化频率为 800Hz)

Fig. 6 Practical  $f_D$  curve demodulation by the processor. (The variation frequency of  $f_D$  is about 800Hz.)

### 参考文献:

- [1] 王仕康, 沈熊. 激光多普勒技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [2] 沈熊, 张松. 激光测速数字相关信号处理器的研制[J]. 实验力学, 1998, 13(3): 294-301.
- [3] 姜建国, 曹建中. 信号与系统分析基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. 321-332.
- [4] 倪养华, 王重苇. 数字信号处理-原理与实现[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998. 195-196.
- [5] Proakis J G, Manolakis D G. *Introduction to Digital Signal Processing* [M]. U. S. A: Macmillan Publishing Company, 1988. 805-812.
- [6] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 122-123.

## Investigation on a laser Doppler velocimetry signal processor based on PC

LIU Chang\_wen, LU Fei, LIU Jie

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new Doppler signal processor used in a LDA system is introduced, where the photoelectric signals are processed on the basis of the power spectrum method by a personal computer(PC). The hardware of the processor is mainly composed of filters, a burst detector, an A/D converter, a RAM and the arriving-moment recorder of burst. The effective Doppler voltage giving the moving velocity of scatter can be extracted from the photoelectrical signal and digitized with the hardware. A PC gathers the digital data through the interface and carries out FFT to get the flowing information of the field. In order to optimize the noise rejection properties of the processor, such techniques as zero-filling, adding windows and zooming were employed. A practical application shows the ability of tracing the turbulent velocities. The processor has the advantages of fine performance, simple structure and low cost. With the development of PC, this kind of LDA signal processing method is sure to have better prospects in the future.

**Key words:** laser Doppler velocimetry; average periodic diagrams; Doppler signal processing

作者简介: 刘昌文(1963-), 男, 四川省富顺人, 教授, 博士, 主要从事激光测速技术和微机测控技术研究。