

# 基于线阵 CMOS 型空时滤波器的新型空间滤波测速仪

何 鑫 龙兴武 周 健 聂晓明

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为了消除速度测量中的方向模糊以及减小测量不确定度,建立了一套基于空时滤波器的新型空间滤波测速仪。设计了一种基于高速互补金属氧化物半导体(CMOS)线阵图像传感器的空时滤波器,并从理论上分析了该类型空时滤波器的滤波特性。采用了快速傅里叶变换法分析输出信号的频谱,并通过能量重心法对频谱进行校正,减小了频率测量不确定度。使用这种新型测速仪对传送带的平移速度进行了测量。实验验证了该空时滤波器对运动方向辨别的可行性。同时,通过实验还分析了速度测量相对标准不确定度。实验结果表明使用空时滤波器的空间滤波测速仪可以使速度测量相对标准不确定度在频率测量相对标准不确定度的基础上大大降低。降低后的速度测量相对标准不确定度小于0.24%,该值还可以通过合理选择空时滤波器的参数来进一步减小。

**关键词** 测量;空间滤波测速仪;空时滤波器;图像传感器;运动方向识别;相对标准不确定度

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0512006

## A Novel Spatial Filtering Velocimeter Based on Linear CMOS-Type Spatiotemporal Filter

He Xin Long Xingwu Zhou Jian Nie Xiaoming

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

**Abstract** In order to eliminate directional ambiguity and to reduce standard uncertainty in velocity measurement, a novel spatial filtering velocimeter based on a spatiotemporal filter is established. The spatiotemporal filter is structured by a high speed complementary metal oxide semiconductors (CMOS) linear image sensor. The spatial filtering characteristic of the filter is analyzed theoretically. The power spectrum of the output signal is obtained by fast Fourier transform (FFT), and is corrected by a frequency spectrum correction algorithm, named energy centrobaric correction. Therefore, the standard uncertainty of frequency measurement is reduced. This novel velocimeter is used to measure the moving velocity of a conveyor belt. The experiment verifies the feasibility of the spatiotemporal filter for directional discrimination. Furthermore, the relative standard uncertainty of velocity measurement is analyzed experimentally. Experimental results of the presented spatial filtering velocimeter using spatiotemporal filter show that the relative standard uncertainty of velocity measurement is much reduced compared with that of frequency measurement. The reduced relative standard uncertainty of velocity measurement is below 0.24%, which can be further reduced by adjusting the parameters of the spatiotemporal filter.

**Key words** measurement; spatial filtering velocimeter; spatiotemporal filter; image sensor; motion directional discrimination; relative standard uncertainty

**OCIS codes** 120.7250; 120.4640; 040.1880

收稿日期: 2014-11-25; 收到修改稿日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61308060)

作者简介: 何 鑫(1987—),男,博士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: wthexin@nudt.edu.cn

导师简介: 龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com(通信联系人)

## 1 引 言

空间滤波测速(SFV)是一种基于光学方法的非接触测量方式,在1963年由Ator<sup>[1]</sup>提出并运用于空间像移测量。SFV具有许多优点,比如稳定性好、结构简单以及测速范围宽等。与激光多普勒测速仪(LDV)相比<sup>[2-4]</sup>,SFV不再必须使用激光作为光源甚至不需要光源,是一种具有较大潜力的非接触测速技术。目前SFV已广泛应用于空间像移测量<sup>[1,5-6]</sup>、液体流速测量<sup>[7-9]</sup>、物体表面速度测量<sup>[10-13]</sup>以及粒子运动速度测量<sup>[14-15]</sup>等领域。

SFV是基于空间滤波效应,利用粒子散射光被空间滤波器调制从而得到一个与物体运动速度成正比的光强信号来获得物体运动速度的。一方面,SFV由于具有空间分辨率较低的缺点,不能得到较高的测量精度。另一方面,由于运动速度大小相等、方向相反的粒子的散射光通过空间滤波器后所产生的光强信号的频率一样,SFV对相差180°的运动方向是模糊的。为了解决方向辨别的问题,一些学者将光学移频的方法应用于空间滤波测速仪系统中。已有的光学移频方法主要有机械旋转法和幅度调制法。其中机械旋转法携带了机械装置,从而降低了系统的稳定性<sup>[16]</sup>。幅度调制法所使用的空间滤波器是液晶盒阵列,通过改变加在液晶盒阵列上的电压的方法来调制液晶盒阵列的光强透射率从而达到移频的目的<sup>[8]</sup>。液晶盒阵列的主要问题有两个,一是响应时间比较长,所以只能测量较低的速度,二是不能消除信号中的基底成分。

为了降低SFV的测量不确定度,本文采用了先进的信号处理方法,在通过快速傅里叶变换(FFT)得到信号频谱之后,再通过频谱校正法对信号频谱进行校正,降低了频率测量不确定度。然后设计一种基于互补金属氧化物半导体(CMOS)线性图像传感器的空时滤波器,从理论上分析了这种类型空时滤波器的滤波特性,通过合理设计空时滤波器的参数和选择合适的算法,在由频率值转换成速度值时进一步降低了速度测量相对不确定度。另一方面,该空时滤波器还能够实现光学移频,因此也可以用于运动物体的方向辨别,而且稳定性好、响应速度快,很好地解决了传统的光学移频方法带来的问题。

## 2 空间滤波测速原理

空间滤波测速仪的基本原理和光学结构如图1所示。运动速度为 $v$ 的物体表面被光源发光二极管(LED)照亮,携带物体速度信息的物体表面的散射光经过成像透镜成像到空间过滤器上。该空间滤波器通常由一组等间距的平行狭缝组成,且平行狭缝与运动物体的运动方向垂直。运动物体的像被平行狭缝调制以后再由聚焦透镜会聚到光电探测器上。被平行狭缝调制后的像包含了与运动物体速度成正比的光强信号,该光强信号由探测器转换成电信号。由物体运动而产生的信号频率 $f$ 与物体运动速度 $v$ 之间的关系为

$$v = \frac{p}{M} f, \quad (1)$$

式中 $p$ 为平行狭缝之间的间距, $M$ 为成像透镜的放大倍数。因此,通过测量被光电探测器接收的光强信号的频率,就可以得到物体运动的速度。

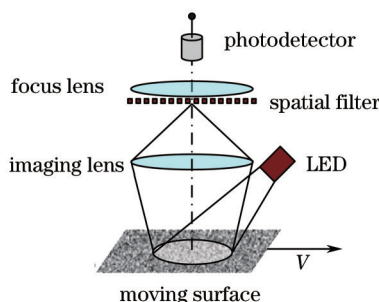


图1 空间滤波测速仪的基本光学结构

Fig.1 Basic configuration of spatial filtering velocimeters

## 3 基于线阵CMOS的空时滤波器

### 3.1 空时滤波器设计

图2显示了基于线阵CMOS空时滤波器的原理图,图中的红色和绿色矩形长条代表像素单元。对于图2

中的 frame 1,所有红色(绿色)像元的组合在结构上就相当于一组平行狭缝,其中红色(绿色)像元部分相当于平行狭缝组的透光部分,而没有红色(绿色)像元的地方则相当于不透光部分。因此,红色像元和绿色像元可以各自作为一个空间滤波器。这两个滤波器在空间上相差  $\pi$  个相位,所以由它们产生的时域信号在时间上也相差  $\pi$  个相位。两个信号相减就得到了一个差分信号,该差分信号不仅能够消除初始信号中的大部分基频分量,同时还使有用信号的幅度加倍,大大提高了信噪比。从这个意义上讲,该线阵 CMOS 组成了一个差分型的空间滤波器。对于图 2 中的其他各帧,由 frame 1 到 frame 8,各帧的红色和绿色像元分配不一样,依次向右移动了一个像元。而 frame 8 之后的一帧会再次回到了 frame 1。在这种情况下,即使测量物体和测速系统是相对静止的,系统也会输出一个偏置频率  $f_{\text{offset}}$ :

$$f_{\text{offset}} = \frac{n}{N} F, \quad (2)$$

式中  $n$  为每相邻两帧图像之间移动的像元数量,  $N$  为完成一次循环所需要的图像数量,  $F$  为 CMOS 的帧频,即相邻两帧图像之间时间间隔的倒数。在图 2 所示的空时滤波器中,当测量物体和测速系统相对运动时,在  $f_{\text{offset}} > f$  条件下,系统所检测到的频率  $f'$  为

$$f' = f_{\text{offset}} - f. \quad (3)$$

因此,(1)式演变为

$$v = \frac{p}{M} f = \frac{p}{M} (f_{\text{offset}} - f'), \quad (4)$$

式中  $f'$  为探测到的信号频率,而  $f$  为被测物体实际运动所产生的信号频率大小。规定当物体的图像运动方向与像元移动方向相同时,  $f$  的符号为正;反之为负。(3)式表明,当物体的图像运动方向与像元移动方向相同时,输出频率  $f'$  小于  $f_{\text{offset}}$ ;反之,输出频率  $f'$  大于  $f_{\text{offset}}$ 。因此,当条件  $f_{\text{offset}} > f$  满足时,可以根据这个特点来辨别物体的运动方向。

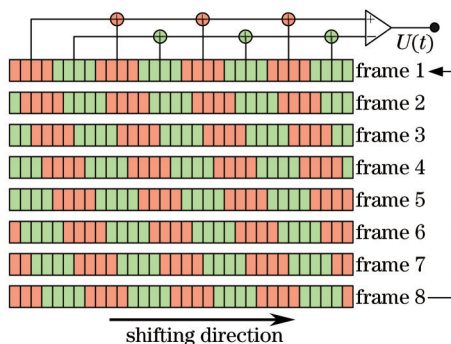


图 2 基于线阵 CMOS 图像传感器的移频原理

Fig.2 Principle of frequency shifting based on linear CMOS image sensor

### 3.2 空时滤波器滤波特性分析

图 2 中 frame 1 所示的差分空间滤波器的光强透射率如图 3 所示。假设 CMOS 在  $x$  方向的尺寸为  $X$ ,在  $y$  方向的尺寸为  $Y$ ,滤波器沿  $x$  移动的速度为  $v_{st} = npF$ ,则该空时滤波器的振幅透射率函数可表示为

$$t(x, y) = \begin{cases} 1, & \left( lp - \frac{\omega}{2} \right) \leq x - v_{st}t \leq \left( lp + \frac{\omega}{2} \right), -\frac{X}{2} \leq x \leq \frac{X}{2}, -\frac{Y}{2} \leq y \leq \frac{Y}{2} \\ -1, & \left( lp + \frac{\omega}{2} \right) \leq x - v_{st}t \leq \left( lp + \frac{3\omega}{2} \right), -\frac{X}{2} \leq x \leq \frac{X}{2}, -\frac{Y}{2} \leq y \leq \frac{Y}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $l$  是整数,  $p$  是狭缝之间的距离,  $\omega = p/2$ 。(5)式可由傅里叶级数表示为

$$t(x, y) = \begin{cases} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \frac{4}{(2m-1)\pi} \cos \left[ \frac{2(2m-1)\pi}{p} (x - v_{st}t) \right], & -\frac{X}{2} \leq x \leq \frac{X}{2}, -\frac{Y}{2} \leq y \leq \frac{Y}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

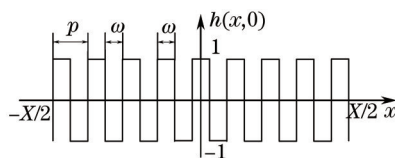


图3 差分空间滤波器的光强透射率示意图

Fig.3 Schematic diagram of intensity transmittance for a differential spatial filter

因为该空时滤波器为线性空间不变系统,它的调制传递函数就是其振幅透射率函数的傅里叶变换。因此,该空时滤波器的调制传递函数可以表示为

$$T(\mu, \nu) = \iint t(x, y) \exp[-j2\pi(\mu x + \nu y)] dx dy . \quad (7)$$

功率谱密度函数是调制传递函数模的平方。因此,把(6)式代入(7)式并取模的平方就可以得到该空时滤波器的功率谱密度函数  $H_p(\mu, \nu)$  为

$$H_p(\mu, \nu) = |T(\mu, \nu)|^2 = \frac{X^2 Y^2}{4} |T_y(\nu)|^2 \left| \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} \frac{4}{(2m-1)\pi} [T_{x_m}^-(\mu) + T_{x_m}^+(\mu)] \right|^2, \quad (8)$$

式中

$$T_y(\nu) = \text{sinc}(\nu Y), \quad (9)$$

$$T_{x_m}^-(\mu) = \text{sinc}\left(\mu X - k \frac{2m-1}{p} X\right), \quad (10)$$

$$T_{x_m}^+(\mu) = \text{sinc}\left(\mu X + k \frac{2m-1}{p} X\right), \quad (11)$$

式中  $k=1-(v_{st}/x)=1-(v_{st}/v')$ ,  $v'$  是运动物体的像的运动速度。(8)式表明该空时滤波器对运动物体像的频谱具有空间选择性,凡是满足条件  $(\mu, \nu) = \{\pm[1-(v_{st}/v')](2m-1)/p, 0\}$  的空间频率才能通过该滤波器。而这些频率的透射率随着  $m$  的增大而迅速衰减,实际上只有  $m=1$  的空间频率

$$\mu = \pm \frac{1-(v_{st}/v')}{p}, \quad (12)$$

对物体运动速度的获取是有用的。而探测器接收到的信号的频率  $f'$  为

$$f' = \mu v'. \quad (13)$$

把(12)式代入(13)式,在条件  $f_{\text{offset}} > f$  下可以得到

$$f' = \mu v' = \frac{v_{st} - v'}{p} = f_{\text{offset}} - f. \quad (14)$$

该式的符号法则与(3)式相同。还可以看出,该式与(3)式本质是一样的,从而在理论上证明了该方法的可行性。

## 4 信号处理

信号处理主要包括两部分,频谱分析与频谱校正<sup>[17-18]</sup>。频谱分析采用最常用的快速傅里叶变换(FFT)法,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以及能够接受间断信号的优点。空间滤波后的时域信号经FFT后的功率谱可表示为

$$S_k = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-j2\pi kn/N) \right|, \quad (15)$$

式中  $x_n$  为时域信号序列,  $N$  为FFT点数,  $k=-N, -N+1, \dots, N-1$ 。如果直接将时域信号功率谱峰值谱线对应的频率作为时域信号频率,会存在精度不高的问题。因此,需要采用频谱校正算法对时域信号的频谱进行修正,这里采用能量重心算法。

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函数的能量重心坐标,该坐标就是频谱峰值对应的主瓣中心,即校正出的准确频率。以加Hanning窗的FFT为例,通过能量重心法校正后的时域信号频率为<sup>[19]</sup>

$$f = \frac{\sum_{i=-n}^n Y_i(x+i)}{\sum_{i=-n}^n Y_i} f_s / N, \quad (16)$$

式中  $Y_i$  为谱线对应的幅值,  $x$  为峰值谱线,  $i$  为与峰值谱线  $x$  相距离  $i$  的谱线,  $f_s$  为采样频率,  $N$  为 FFT 所用的点数。

信号处理流程如图 4 所示。运动物体表面成像在 CMOS 光敏面上后被转换成模拟电信号, 该模拟信号被模数(AD)模块采集并传至现场可编程门阵列(FPGA)进行存储和空间滤波, 从而得到时域差分信号。差分信号经串口(RS232)传输到 PC 机进行信号处理, 信号处理全部由 Labview 完成。首先对差分信号进行 FFT 得到其频谱, 再运用频谱校正技术对频谱进行修正, 最后在修正后的频谱中提取信号的频率, 结合空时滤波器的参数即可求得测速仪与物体的相对运动速度<sup>[20]</sup>。

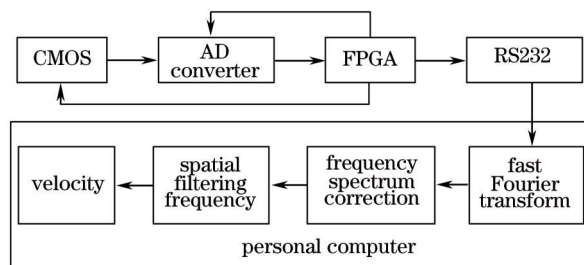


图 4 信号处理流程

Fig.4 Flow chart of signal processing

## 5 实 验

### 5.1 实验方法

实验中搭建了如图 5 所示的实时空间滤波测速仪系统, 被测对象为传送带的平动速度。传送带的主动轮为瑞士进口的高精度速率转台, 转速稳定性高达  $10^{-5}$ 。光学系统的光轴与传送带的运动速度方向垂直, CMOS 线阵图像传感器像元阵列方向与传送带运动方向平行, 从而使物体运动速度在垂直于图像传感器像元阵列方向没有分量。照明部分采用大功率发光二极管(LED)灯珠, 经过准直后较均匀地照射在传送带的被测表面上。被测表面经过光学系统成像在图像传感器上, 再经过信号处理系统解算出物体的运动速度。

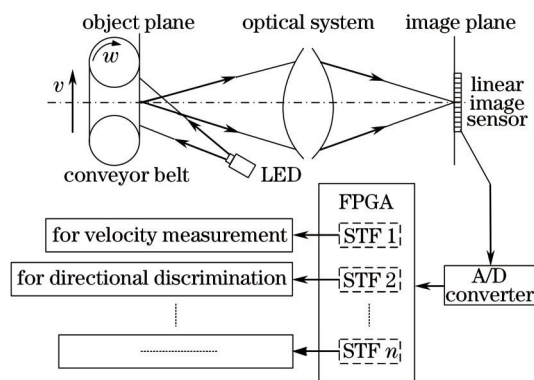


图 5 空间滤波测速仪的实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental setup of spatial filtering velocimeter

在本系统中, 方向辨别和速度测量相对标准不确定度的降低需要同时实现, 但是在实现过程中两者所需要的空时滤波器的参数不尽相同。因此, 需要同时产生两路空时滤波器。在图 5 中, 图像传感器的输出经 AD 转换后输入到 FPGA。FPGA 同时产生两路空时滤波器(STF1 和 STF2), 两者的参数可以由 FPGA 根据所测速度的大小进行调节。此外, 还可以根据需求产生多路空时滤波器。由此可以看出, 采用图像传感器作为空时滤波器给系统的设计带来了极大的便利。



### 5.2 速度测量不确定度降低实验

速度测量不确定度的降低分两步来实现。首先通过频谱校正算法来校正由FFT得到的信号的功率谱,初步降低频率测量的不确定度;第二步则是通过原理公式把频率转换成速度时实现的,在转换之后,速度测量相对标准不确定度相对于频率测量相对标准不确定度有较大幅度的降低。其中相对标准不确定度 $\varepsilon$ 的定义为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (17)$$

式中 $\sigma$ 为测量标准偏差,  $\mu$  为测量平均值。

为了验证重心法频谱校正算法的有效性,任取一组实验数据进行了对比。图6显示了对比结果。其中图6(a)的测量结果没有采用频谱校正算法,而是直接使用FFT功率谱最大值点来计算信号频率;图6(b)为采用FFT得到信号的功率谱后再采用重心法频谱校正算法计算得到的信号频率。通过对比图6(a)和图6(b)可知,采用频谱校正算法得到的频率的集中度增加,波动幅度减小。通过进一步分析,图6(a)中测量结果的平均值为144.5719 Hz,测量标准差为0.7039 Hz,相对标准不确定度为0.49%;图6(b)中测量结果平均值为144.5660 Hz,测量标准差为0.5216 Hz,相对标准不确定度为0.36%。因此,重心法频谱校正技术确实能够降低测量不确定度。

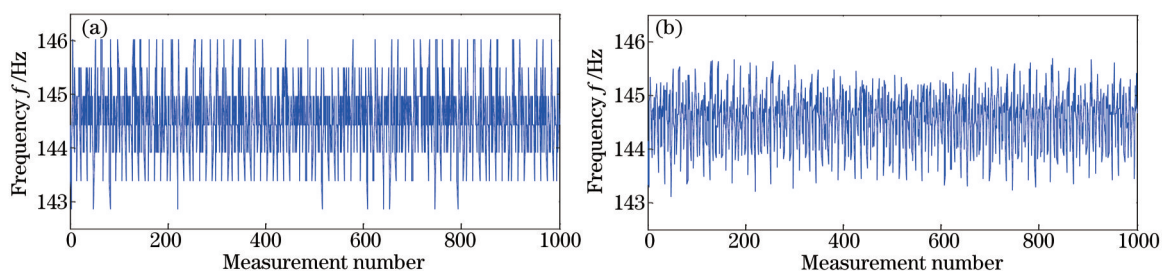


图6 频率测量实验结果。(a) FFT; (b) 频谱校正

Fig.6 Experimental results of frequency measurement obtained by (a) FFT and (b) frequency spectrum correction

下面讨论在由频率到速度的转换过程中如何降低速度测量相对标准不确定度。定义 $\sigma_v$ 为速度测量标准偏差,  $\sigma_f$ 为频率测量标准偏差。把(4)式中的条件改为 $f_{\text{offset}} < f$ ,且把像元移动方向与物体运动方向设为一致,则(4)式可以演变为

$$v \pm \sigma_v = \frac{P}{M}(f_{\text{offset}} + f' \pm \sigma_f) = \frac{P}{M}(f_{\text{offset}} + f') \pm \frac{P}{M}\sigma_f, \quad (18)$$

从而可以得到

$$v = \frac{P}{M}(f_{\text{offset}} + f'), \quad (19)$$

$$\sigma_v = \frac{P}{M}\sigma_f. \quad (20)$$

从而速度测量相对标准不确定度 $\varepsilon_v$ 和频率测量相对标准不确定度 $\varepsilon_f$ 之比为

$$\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_f} = \frac{\sigma_v/v}{\sigma_f/v} = \frac{f'}{f_{\text{offset}} + f'}. \quad (21)$$

从(21)式可以看出,速度测量相对不确定度在频率测量相对不确定度的基础上明显降低了,而且,随着偏置频率 $f_{\text{offset}}$ 与系统探测到的频率 $f'$ 的比值增大而降低得越多。

为了论证该方法确实能够降低速度测量的相对标准不确定度,进行了如下实验。(2)式中的 $n/N$ 分别取2/16和4/16以获得不同的偏置频率1014.610 Hz和2029.220 Hz。为了使 $f_{\text{offset}} < f$ 条件得到满足,测量最低速度时转台的角速度为450°/s,并使像元移动方向与传送带像的运动方向一致。从450°/s到800°/s每隔50°/s测量一组数据。在450°/s到750°/s速度范围内偏置频率为1014.610 Hz,而800°/s时偏置频率为2029.220 Hz。测量结果与相对标准测量不确定度如表1所示。

### 5.3 方向辨别实验

(3)式表明该空时滤波器可以用来识别物体的运动方向,下面用实验来验证该方法的可行性,分别检验

表 1 速度测量结果和相对标准不确定度分析

Table 1 Results of velocity measurement and analysis of relative standard uncertainty

Rotating velocity / [(°)/s]	Calculated linear velocity / (m/s)	Frequency measurement			Velocity calculation			Ratio of $\varepsilon_v / \varepsilon_f$
		Mean $f$ / Hz	Standard deviation $\sigma_f$ / Hz	Relative uncertainty $\varepsilon_f$	Mean $v$ / (m/s)	Standard deviation $\sigma_v$ / (m/s)	Relative uncertainty $\varepsilon_v$	
450	1.4137	144.566	0.5216	0.00361	1.4131	0.00064	0.000450	0.12
500	1.5708	273.826	1.0313	0.00377	1.5707	0.00126	0.000800	0.21
550	1.7279	402.420	1.7623	0.00438	1.7274	0.00215	0.001244	0.28
600	1.8850	533.940	2.4455	0.00458	1.8878	0.00298	0.001579	0.34
650	2.0420	662.387	3.3137	0.00477	2.0443	0.00404	0.001976	0.41
700	2.1991	791.471	3.7783	0.00477	2.2017	0.00461	0.002092	0.44
750	2.3562	919.781	4.4663	0.00486	2.3581	0.00544	0.002309	0.48
800	2.5133	33.009	0.1566	0.00474	2.5140	0.00019	0.000075	0.02

当转台以顺、逆时针旋转和静止时系统输出信号的频率大小,并规定顺时针旋转转速为正,反之为负。根据(2)式计算得到本实验中采用的偏置频率 $f_{\text{offset}}=1014.610$  Hz。当转台以 $-100^\circ/\text{s}$ 、 $0^\circ/\text{s}$ 和 $100^\circ/\text{s}$ 的转速旋转时,时域差分信号频谱如图7所示。当转台的转速为 $0^\circ/\text{s}$ 时,系统输出频率为1015 Hz(图7中的标记忽略了数值的小数部分,但不会影响实验结果),即为偏置频率;当转台的转速为 $-100^\circ/\text{s}$ 时信号频率约为1276 Hz,在偏置频率为1015 Hz的基础上增加了261 Hz;而当转台的转速为 $100^\circ/\text{s}$ 时信号频率约为753 Hz,在偏置频率的基础上减少了262 Hz。由此可以看出,确实可以根据输出信号频率相对于偏置频率的偏移方向来判别速度方向。频率的增加和减少的不一致是由测量误差造成的,并且该测量误差在允许的范围之内。

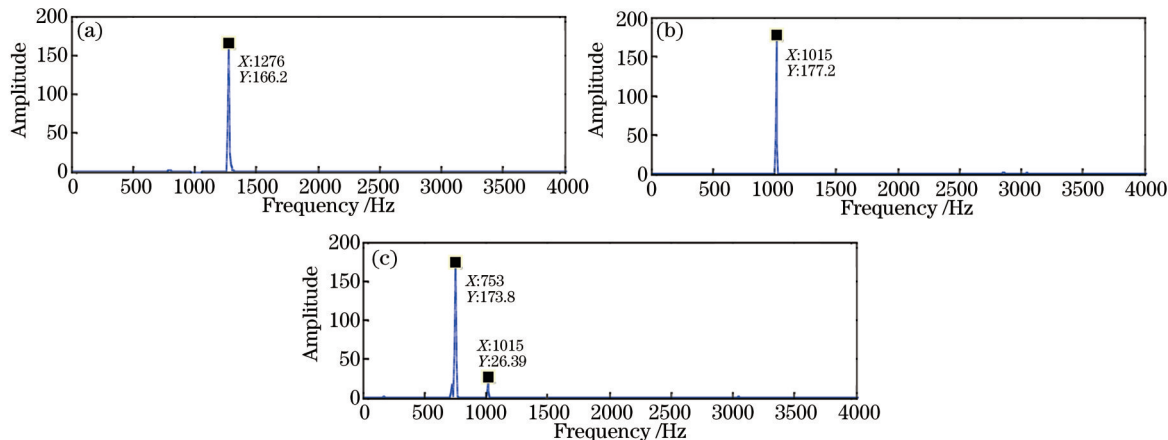


图 7 方向辨别实验结果。(a)  $-100^\circ/\text{s}$ 转动时域信号频谱; (b)  $0^\circ/\text{s}$ 转动时域信号频谱; (c)  $100^\circ/\text{s}$ 转动时域信号频谱

Fig.7 Experimental results of directional discrimination: power spectra of signals when the rotary table is rotating at (a)  $-100^\circ/\text{s}$ , (b)  $0^\circ/\text{s}$  and (c)  $100^\circ/\text{s}$

## 6 实验结果讨论

由表1最后一列可知:1)速度测量相对标准不确定度在频率测量相对标准不确定度的基础上至少能降低一半,而最多可以降至2%,降低后的速度测量相对标准不确定度都在0.24%以下,最小达到了0.0075%;2)较小的测量频率与偏置频率比值可以得到较小的相对标准不确定度,因此可以合理选择(2)式中的比值 $n/N$ 以获得较小的频率测量与偏置频率比值,如使(2)式中的 $n/N$ 取3/16,从而可以得到1521.915 Hz的偏置频率,把这个偏置频率运用于 $650^\circ/\text{s}$ 到 $750^\circ/\text{s}$ 速度范围内的测量,就可以进一步减小这一段速度范围内的相对标准不确定度;3)测量速度越大该方法的优势更明显,因为此时可以采用更高的偏置频率 $f_{\text{offset}}$ ,而探测到的

频率 $f'$ 则仍然可以保持在较小的值,由(21)式可知不确定度的降低就更明显。在实际测量中,可以采用图8所示的反馈环节对偏置频率 $f_{\text{offset}}$ 进行控制,根据物体运动速度大小来实时调节偏置频率的大小,从而使系统探测到的频率 $f'$ 始终保持一个较小的值。

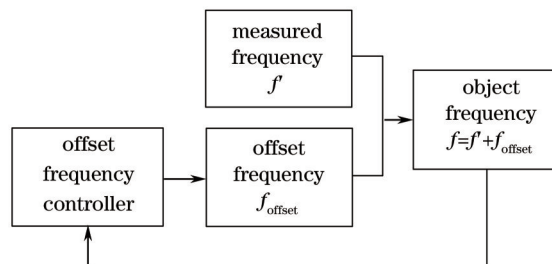


图8 偏置频率 $f_{\text{offset}}$ 的实时控制示意图

Fig.8 Schematic diagram of real-time control of offset frequency  $f_{\text{offset}}$

由图7可以看出,当转台以 $100^\circ/\text{s}$ 旋转时,频谱图出现了约为1015 Hz的小尖峰,其值等于偏置频率。这实际上是信号基底,它是由被测表面光照不均匀引起的。测速系统采用了信号差分方法,理论上可以完全消除信号中的基底成分,但由于光照不均匀造成两路参加差分的信号中基底成分的强度不一样,从而使得差分以后,两路信号中的基底成分不能完全抵消掉,仍然有一部分残留在信号中。采用这里所用的空时滤波器后,这些残留的基底成分被移频到偏置频率,从而使频谱图中出现了与偏置频率值相等的频谱小尖峰。解决该问题较有效的方法就是调整好光路,使照射在物体表面上的光尽量均匀。

## 7 结 论

本文建立一种基于空时滤波器的新型空间滤波测速仪,大大降低了速度测量相对标准不确定度,并消除了两个相差 $180^\circ$ 运动方向的模糊性。详细阐述了使用CMOS线阵图像传感器来构造空时滤波器的方法,并从理论上证明了基于CMOS的空时滤波器的可行性和推导了计算公式。由于CMOS图像传感器的灵活性,可以通过FPGA编程来同时实现两个空时滤波器以分别应用于速度测量相对不确定度的降低和运动方向识别,即使有更多路滤波器的需求也可以通过一样的方法来实现。另外,不同的测量速度需要不同的空时滤波器的参数,而这可以在测量过程中实时调整。本文使用该新型测速仪对传送带的移动速度进行了实时测量。实验验证了空时滤波器用于运动方向识别的可行性。频率解算中运用FFT和频谱校正算法,降低了频率测量的不确定度。在把频率转换成速度时利用了空时滤波器频移特性,把速度测量相对标准不确定度在频率测量相对标准不确定度的基础上进一步降低。在本次实验中,速度测量相对标准不确定度至少降低为频率测量相对标准不确定度的50%,最大值低于0.24%,该值可以通过合理选择空时滤波器的参数进一步降低。因此,基于CMOS线阵图像传感器的空时滤波器对空间滤波测速仪测量不确定度的降低有很大的作用。此测速系统不仅有较高的测量精度,而且也有较大的测速范围,在固体表面运动速度测量以及车载惯性自主导航系统中具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Ator J T. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles[J]. J Opt Soc Am, 1963, 53(12): 1416-1422.
- 2 Wu Zhanjun, Han Fengshan, Fan Zhe, *et al.*. Triple-beam laser Doppler velocimeter based on Janus configuration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071404.  
 郭战军, 韩凤山, 范哲, 等. 基于Janus配置的三光束激光多普勒测速仪[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 071404.
- 3 Zhang Yuexin, Niu Yanxiong, Han Fengshan, *et al.*. Impact of attitude errors on three-dimensional velocity measurement accuracy of airborne laser Doppler[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041402.  
 张月新, 牛燕雄, 韩凤山, 等. 姿态误差对机载激光多普勒三维速度测量精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041402.
- 4 Fan Zhe, Zhang Chunxi, Ou Pan, *et al.*. research on beam pointing angle for three-beam Doppler vehicle lidar[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0214001.



- 范 哲, 张春熹, 欧 攀, 等. 车载三波束多普勒激光雷达波束配置研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0214001.
- 5 Zheng Lina, Kuang Haipeng, Li Wenming, *et al.*. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0211001.
- 郑丽娜, 匡海鹏, 李文明, 等. 基于线阵 CCD 的空间滤波测速信号基频消除方法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0211001.
- 6 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112002.
- 郑丽娜, 张 涛, 匡海鹏, 等. 基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112002.
- 7 Ushizaka T, Asakura T. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(12): 1870-1874.
- 8 Itakura Y, Sugimura A, Tsutsumi S. Amplitude-modulated reticle constructed by a liquid crystal cell array[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(16): 2819-2826.
- 9 Michel K C, Fiedler O F, Richter A, *et al.*. A novel spatial filtering velocimeter based on a photodetector array[J]. *IEEE Trans on Instrum Meas*, 1998, 47(1): 299-303.
- 10 He Xin, Nie Xiaoming, Zhou Jian, *et al.*. Velocity measurement for moving surfaces using spatial filtering method based on area image sensor[J]. *Optik*, 2014, 125(24): 7136-7139.
- 11 He Xin, Zhou Jian, Nie Xiaoming, *et al.*. A novel spatial filtering velocimeter based on a linear image sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4117-4122.
- 何 鑫, 周 健, 聂晓明, 等. 基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4117-4122.
- 12 Uddin M S, Inaba H, Itakura Y, *et al.*. Estimation of the surface velocity of debris flow with computer-based spatial filtering[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(26): 6234-6239.
- 13 Aizu Y, Ushizaka T, Asakura T, *et al.*. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating: a practical velocimeter[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(1): 31-38.
- 14 Xu Chuanglong, Li Jian, Wang Shiming. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array[J]. *Flow Meas Instrum*, 2012, 26: 68-78.
- 15 Dong Zhengchao, Michel K, Bergeler S, *et al.*. The application of CCD spatial filtering in the detection of particle velocity[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2000, 21(2): 211-214.
- 董正超, Michel Klaus, Bergeler Swen, 等. CCD 器件空间滤波在微粒运动速度检测上的应用[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 211-214.
- 16 Aizu Y, Asakura T. *Spatial Filtering Velocimetry: Fundamentals and Applications*[M]. New York: Springer, 2005.
- 17 Zhou Jian, Long Xingwu. Research on multipoint layer-type laser Doppler self-velocimeter[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1316-1321.
- 周 健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1316-1321.
- 18 Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1837-1844.
- 周 健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1837-1844.
- 19 Ding Kang, Jiang Liqi. Energy centrobaric correction method for discrete spectrum[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14(3): 354-358.
- 丁 康, 江利旗. 离散频谱的能量重心校正法[J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 354-358.
- 20 Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 632-638.
- 周 健, 魏 国, 龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 632-638.

栏目编辑: 何卓铭