

基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法

郑丽娜^{1,2} 张涛¹ 匡海鹏¹ 李文明¹ 杨永明¹ 远国勤^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于空间滤波测速原理,提出了利用线阵 CCD 空间滤波效应进行航空相机像移速度测量的新方法。对线阵 CCD 输出图像进行隔行采样,模拟了多狭缝的空间滤波特性,实现了对航空相机像移速度的光学非接触测量。通过研究空间滤波器的功率谱密度函数,对影响线阵 CCD 空间滤波特性的关键因素进行了特性分析,并在实验上验证了利用线阵 CCD 推扫图像模拟多狭缝空间滤波器测量像移速度的可行性。结果表明,对于 5~53.2 mm/s 范围内的像移速度,测量误差导致的像移量误差不大于 1/3 pixel,能够满足航空相机像移补偿精度的要求。

关键词 测量;像移速度测量;线阵 CCD;空间滤波;航空相机

中图分类号 V475.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1112002

Image Motion Velocity Measurement Technique Based on Spatial Filtering Effect of Line CCD for Aerial Camera

Zheng Lina^{1,2} Zhang Tao¹ Kuang Haipeng¹ Li Wenming¹

Yang Yongming¹ Yuan Guoqin^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on spatial filtering velocimetry, a new method is proposed by using spatial filtering effect of line CCD for aerial camera. Spatial filtering characteristic of spatial slits is simulated by doing interval sampling with line CCD image, by which an optical non-contact measurement about aerial camera image motion velocity is realized. Besides, with the research of spatial filtering power spectrum density function, key factors affecting the spatial filtering characteristic of line CCD are analyzed. The possibility of measurement about image motion velocity with line CCD push broom image simulating spatial filtering effect is validated with experiments. The results show that the measurement error is less than 1/3 pixel for an image motion velocity between 5 and 53.2 mm/s, which satisfies the requirement of image motion compensating precision for aerial camera.

Key words measurement; measurement of image motion velocity; line CCD; spatial filtering; aerial camera

OCIS codes 120.0280; 070.6110; 100.2000; 040.1520; 110.2960

1 引言

航空相机照相时,由于飞行器前向飞行等原因引

起的曝光期间地面景物与成像介质间的相对运动,导致像移速度(像速)产生。像速的存在极大地影响了

收稿日期: 2012-05-16; 收到修改稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724001)资助课题。

作者简介: 郑丽娜(1981—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事航空相机成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: ailsazheng@163.com

导师简介: 张涛(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机探测与成像技术等方面的研究。

E-mail: zhangt@ciomp.ac.cn

相机的成像质量,必须进行补偿^[1]。像速的补偿方法有很多,如光学补偿法、机械式补偿法、集成像移补偿法、电子式补偿法以及数字式补偿法等^[2]。无论以何种方式进行补偿,都需要对像速进行精确的测量。目前飞机上虽然能够通过气压高度表、无线电高度表以及空速器给出照相时的速高比值,从而计算出像移速度,但其测量精度和测量范围都无法满足航空相机快速发展的要求,因此必须独立获取像移速度。

在速度测量领域,光学非接触法测速应用非常广泛,包括激光多普勒方法^[3]、激光斑纹法^[4]、相关法^[5~8]和多狭缝空间滤波法等。其中空间滤波法测速(SFV)于1963年由美国的 Ator^[9]首先提出,他从理论上分析了利用平行刻线敏感像速的原理。空间滤波测速法光学及机械结构简单,可使用非相干光源甚至不需要光源,因此得到了较多的应用。传统的空间滤波法是将透射光栅作为空间滤波器放置于光学系统的焦面上,在其后侧放置光电倍增管^[9];随着对空间滤波技术研究的深入,出现了利用液晶元件阵列作为空间滤波器来测量液体流速的方法^[10];随着 CCD 技术的发展,将工业化的 CCD 图像传感器作为空间滤波器同时又作为光电接收器件的应用越来越多^[11,12]。CCD 空间滤波法在测速方面的研究与应用已有多篇报道^[4,13,14],但是这些基于 CCD 的空间滤波测速法由于其频率特性的限制只适用于测量液体流速或运动物体表面速度^[15,16]。本文提出利用线阵 CCD 的空间滤波特性进行航空相机像移速度测量的新方法,通过对线阵 CCD 推扫所产生的图像进行隔行采样,模拟空间滤波狭缝的窄带通频率特性进行速度测量。此方法可根据地面目标的频率分布特征灵活调整其频率特性,能够用于航空相机像移速度的精确测量。

2 空间滤波法的原理及特性

2.1 多狭缝空间滤波法原理

多狭缝空间滤波法原理如图 1 所示^[17]。航空相机及载体以一定的速度水平飞行,通过相机镜头 L,运动物体成像在有一定空间周期分布的空间狭缝(SF)上,像移速度为 v ,空间狭缝刻线与物体运动方向垂直。由于图像速度的存在,所有通过空间狭缝的光强产生周期性的变化,并由空间狭缝后方的光电探测器(PD)接收。由于狭缝存在窄带通滤波特性,仅获取运动图像的特定空间频率成分,可认为运动图像的光振幅在传送时被空间狭缝调制了。因此光电探测器的输出信号中包含与像移速度 v 相关

的频率 f ,速度 v 可由

$$v = p \times f \quad (1)$$

确定,其中 p 为狭缝的空间周期。

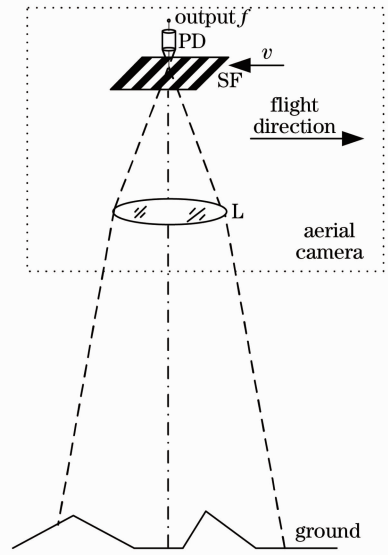


图 1 空间滤波法测速的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SFV

2.2 多狭缝空间滤波特性分析

设 $h(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 分别为空间狭缝与地面景物在像面上的光强分布,且像移速度 v 只发生在垂直于狭缝方向,则光电探测器的输出信号以卷积表示为

$$g(x_r, y_r) = \iint f(x_r - x, y_r - y)h(x, y)dx dy, \quad (2)$$

式中 $x_r = u + c_1, y_r = c_2, x_r$ 和 y_r 表示在像面轴系中,输出信号在水平运动方向及垂直运动方向的位置, c_1 和 c_2 为常数。一般可认为地面目标的光强分布在时间和空间上满足随机过程。如果光强分布 $f(x, y)$ 满足静态随机遍历过程,则输出信号 $g(x_r, y_r)$ 的相关函数为

$$R(\tau_x, \tau_y) = E[g(x_r + \tau_x, y_r + \tau_y)g(x_r, y_r)]. \quad (3)$$

对(3)式进行傅里叶变换,去掉常数部分,则空间功率谱密度函数为

$$G_p(\mu, \nu) = F_p(\mu, \nu) | H(\mu, \nu) |^2, \quad (4)$$

式中 $H(\mu, \nu)$ 为 $h(x, y)$ 的傅里叶变换, $F_p(\mu, \nu)$ 为光强分布函数 $f(x, y)$ 的空间功率谱密度函数,即

$$H(\mu, \nu) = \iint h(x, y)\exp[-2\pi j(\mu x + \nu y)]dx dy, \quad (5)$$

$$F_p(\mu, \nu) = \lim_{T_x, T_y \rightarrow \infty} \frac{1}{4T_x T_y} \left| \int_{-T_x}^{T_x} \int_{-T_y}^{T_y} f(x, y) \times \exp[-2\pi j(\mu x + \nu y)]dx dy \right|^2. \quad (6)$$

由于透射函数 $h(x, y)$ 在垂直于运动方向上都是相同的, 则相对空间频率 ν 的功率谱密度函数可表示为

$$G_p(f) = \frac{1}{\nu} \int_{-\infty}^{+\infty} F_p\left(\frac{f}{\nu}, \nu\right) \left| H\left(\frac{f}{\nu}, \nu\right) \right|^2 d\nu. \quad (7)$$

由(4)式可知, 对于输入函数 $F_p(\mu, \nu)$ 来说, $|H(\mu, \nu)|^2$ 相当于一个滤波函数。由于狭缝具有空间周期透射比, 因此 $|H(\mu, \nu)|^2$ 具有窄带滤波特性, 它的中心频率在 $\mu = \pm \frac{1}{p}$ 处。因此(7)式中空间功率谱 $G_p(f)$ 在 $f = \nu/p$ 处同样有一个尖峰, 通过测量尖峰频率 f , 即可以得出像移速度 v 。

3 基于线阵 CCD 空间滤波效应的像速测量法

对于线阵 CCD, 其本身是一个只有一条单缝的

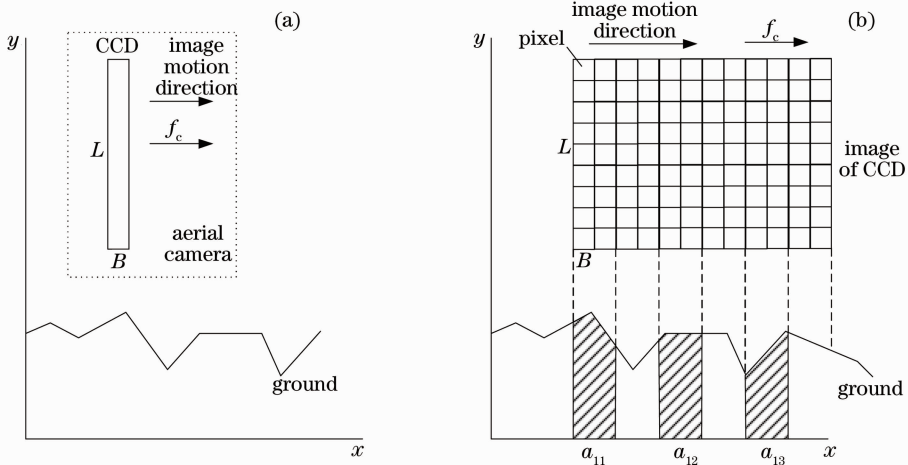


图 2 线阵 CCD 推扫及成像过程。(a)线阵 CCD 推扫过程;(b)线阵 CCD 推扫所成图像

Fig. 2 Process and image of line CCD push broom imaging. (a) Process of push broom imaging; (b) image of push broom imaging

由 2.1 节对多狭缝空间滤波法的描述可知, 利用隔行累加的方式, 可模拟空间滤波狭缝的遮光和透光作用。 A_1 即相当于对一个有 n 条刻线的空间狭缝的一次采样值, 如图 3 所示。第二次采样从第二行开始按照同样的方式进行 n 次累加, 得到 $a_{21} \sim a_{2n}$, 同样进行积分, 得

$$A_2 = \sum_1^n a_{2n}. \quad (9)$$

这个过程相当于对图 1 中光电探测器 PD 的输出进行离散采样的过程, 采样频率即为线阵 CCD 的行转移频率。所得到的采样序列 $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$, 即相当于光电探测器的 m 次采样值。

空间滤波狭缝, 具有一定的空间滤波特性, 但是一条狭缝难以测量速度^[9]。如果能将线阵 CCD 的一条单缝扩展为多个狭缝, 则可以利用多狭缝空间滤波原理进行速度测量。

3.1 线阵 CCD 多狭缝空间滤波器

图 2(a)为线阵 CCD 航空相机对地面景物推扫成像过程示意图, f_c 为线阵 CCD 的行转移频率, L 为 CCD 有效像素尺寸, B 为 CCD 像素尺寸。相机推扫所成的图像如图 2(b)所示, 图中单个方框代表图像的 1 个像素。定义 x 方向为图像的列, y 方向为图像的行。从图像第 1 行开始, 将第 1、2 行的图像灰度值相加得 a_{11} , 隔两行将第 5、6 行的图像灰度值相加得 a_{12} , 依此类推, 经过 n 次累加处理可得到 $a_{11} \sim a_{1n}$ 。将所得的一系列值进行积分, 得

$$A_1 = \sum_1^n a_{1n}. \quad (8)$$

图 3 为模拟空间狭缝对线阵 CCD 输出图像进行采样的过程图, 两个狭缝分别是对线阵 CCD 的输出隔两行进行累加, 并进行两次采样所形成的空间狭缝, 此时狭缝的个数为 n , 狭缝长度为 L , 空间周期 $p = 4 \times B$ 。通过调整每次累加间隔的行数和累加的次数可以灵活地调整空间狭缝的空间周期和刻线个数, 这是物理的空间狭缝所不具备的能力。最后对所得到的采样序列 A 所包含的尖峰频率进行采集, 由(1)式即可以得到所求的像移速度。

3.2 线阵 CCD 模拟多狭缝空间滤波器的关键参数

影响滤波器空间滤波特性的关键参数有狭缝空间周期、狭缝长度及狭缝个数。设线阵 CCD 模拟多

狭缝空间周期 $p=2b$, 狭缝长度为 L , 狭缝个数为 N , 在垂直于运动方向上具有相同的透过函数 $h(x, y)$ 。

为计算方便, 取 $h(y)=1$, 则透过函数 $h(x)$ 如图 4 所示, 即

$$h(x) = \begin{cases} 1, & 2Nb < x \leq (2N+1)b \\ 0, & (2N+1)b < x \leq (2N+2)b \end{cases} \quad (N = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

空间狭缝的传递函数为^[18]

$$H(\mu, \nu) = \iint h(x, y) \exp[-2\pi j(\mu x + \nu y)] dx dy = \int_0^L h(y) \exp(-2\pi j \nu y) dy \int_0^{(2N+2)b} h(x) \exp(-2\pi j \mu x) dx = \frac{1 - \exp(-j2\pi \nu L)}{j2\pi \nu} \times \frac{1 - \exp(-j4\pi N \mu b)}{1 - \exp(-j4\pi \mu b)} \times \frac{1 - \exp(-j2\pi \mu b)}{j2\pi \mu} = LNb \times \frac{\sin(\pi \nu L)}{2L\pi \nu} \times \frac{\sin(2N\pi \mu b)}{2\pi N b \mu \cos(\pi \mu b)} \exp\{-\pi j[\nu L + (2N-1)\mu b]\}. \quad (11)$$

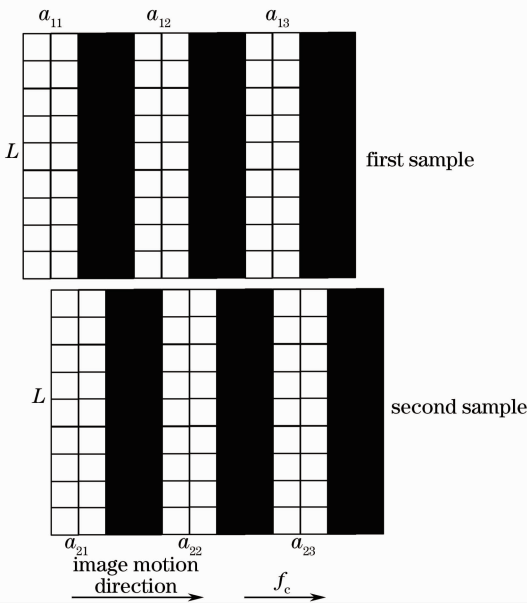


图 3 模拟空间狭缝对线阵 CCD 输出图像进行采样的过程
Fig. 3 Sampling process of line CCD image by simulating spatial slits

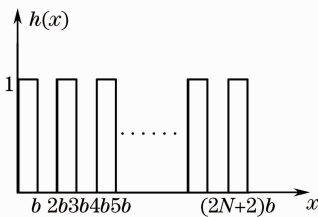


图 4 模拟多狭缝空间滤波器透过函数 $h(x)$
Fig. 4 Light transmittance distribution of spatial filter $h(x)$

由(11)式可得空间滤波狭缝的功率谱特性 $|H(\mu, \nu)|^2 = A^2 |H_L(\nu)|^2 |H_{b,N}(\mu)|^2$. (12)

3.2.1 狭缝长度

由(11)、(12)式可知, 增大狭缝长度 L 能够增

加信号振幅, 有利于信号提取, 但 L 太长会影响滤波效果, 且导致运算数据量增大, 影响测量速度。综合考虑测量精度及测量速度, 依据实验情况, L 应取 4~16 mm。

3.2.2 狭缝空间周期

狭缝空间周期 $p = 2b$, 将(12)式中的 $|H_{b,N}(\mu)|^2$ 对 b 求偏导, 为使空间狭缝的频率特性最优, 令其等于 0, 即

$$\frac{\partial |H_{b,N}(\mu)|^2}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \left[\frac{\sin(2N\pi \mu b)}{2\pi N b \mu \cos(\pi \mu b)} \right]^2 = 0, \quad (13)$$

即

$$\sin(2N\pi \mu b) = 0, \quad (14)$$

$$2N \cos(2N\pi \mu b) \cos(\pi \mu) + \sin(2N\pi \mu b) \sin(\pi \mu b) = 0. \quad (15)$$

(15)式为超越方程, 只能用图解法求解, 且没有唯一解, 因此仅就(14)式进行讨论。 N 为整数, 因此可得

$$2\pi \mu b = k\pi, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (16)$$

即

$$\mu = \frac{k\pi}{2\pi b} = \frac{k}{p}. \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (17)$$

速度测量要求有较高的 μ 值, 由(17)式可知, 空间周期 p 取值越小, 则 μ 越大。但对于线阵 CCD 空间滤波器来说, 其采样频率为线阵 CCD 的行频, 根据采样定理可知^[18], 被测像速与采样频率应满足

$$f_c \geq 2 \frac{v_g}{b} = 4 \frac{v_g}{p}, \quad (18)$$

式中 v_g 为被测像速最大值, 因此狭缝空间周期的选取与被测速度最大值及给定的行频有关。

3.2.3 狭缝个数

设空间滤波狭缝中心频率 $\mu_c = \frac{1}{p}$, 空间通频带 μ_p 定义为 $|H_{b,N}(\mu)|^2$ 值下降到 $0.5 |H_{b,N}(\mu_c)|^2$ 处的两频率的间隔宽度, 可计算得

$$\mu_p = k \frac{\mu_c}{N} = k \frac{1}{pN}, \quad (19)$$

式中 k 为常数。当 p 确定时, 狭缝个数 N 越大, 则空间滤波狭缝的通频带宽越窄, 狭缝的选择性越好; 但 N 选择过大会降低信号处理的速度, 对测量速度产生影响。

3.2.4 关键参数验证

分别取 $L = 8 \text{ mm}$, $p = 0.16 \text{ mm}$, $N = 6$ 及 $L =$

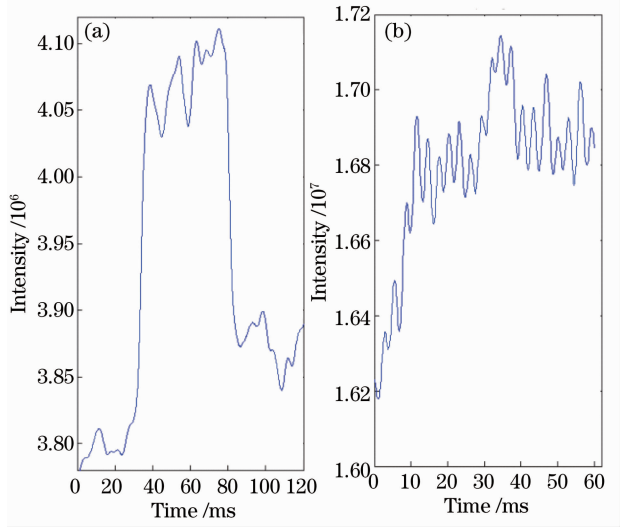


图 5 对两组参数的空间滤波器进行采样的时域信号。

(a) $L = 8 \text{ mm}$, $p = 0.16 \text{ mm}$, $N = 6$; (b) $L = 10 \text{ mm}$, $p = 0.064 \text{ mm}$, $N = 12$

Fig. 5 Sampling signals of spatial filters with different parameters. (a) $L = 8 \text{ mm}$, $p = 0.16 \text{ mm}$, $N = 6$;

(b) $L = 10 \text{ mm}$, $p = 0.064 \text{ mm}$, $N = 12$

10 mm , $p = 0.064 \text{ mm}$, $N = 12$ 两组参数, 利用 Matlab 处理软件对线阵 CCD 的输出图像进行离散采样, 采样后的时域信号如图 5 所示。可以看出狭缝个数较多、空间周期较小时的采样时域信号频率特性较好。

4 实验结果及分析

为验证提出的线阵 CCD 空间滤波像速测量方法, 设计了图 6 所示的实验成像装置。将线阵 CCD 和镜头固定在精密转台上, 线阵 CCD 安装于镜头焦面上, 精密转台带动镜头和线阵 CCD 转动, 用以模拟线阵 CCD 航空相机的推扫成像过程。线阵 CCD 采用 DALSA 公司的高灵敏度 ZET 相机, 像素尺寸为 $8 \mu\text{m}$, 有效像素数为 7542 pixel, 行频输入范围为 $250 \sim 25000 \text{ Hz}$; 镜头采用 PENTAX 定焦镜头, 焦距为 200 mm 。

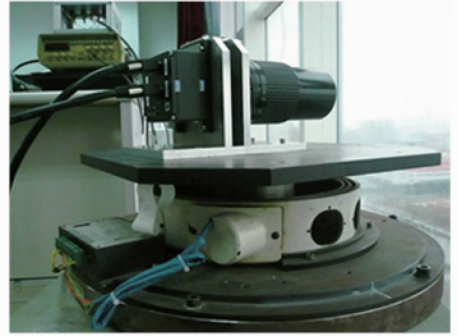


图 6 实验成像装置

Fig. 6 Experimental imaging setup

实际的像移速度为

$$v' = \omega \times f, \quad (20)$$

式中 ω 为转台转速, f 为镜头焦距。

设定转台转速为 0.266 rad/s , 给定线阵 CCD 行频为 4000 Hz , 实验采集到的图像如图 7 所示。



图 7 实验采集图像

Fig. 7 Collected image in experiment

依据 3.2 节对空间滤波器各关键参数的分析, 设定狭缝数量 $N=10$, 空间周期 $p=0.16\text{ mm}$, 狭缝长度 $L=10\text{ mm}$. 取采样频率 $f_c=4000\text{ Hz}$, 按照 3.1 节描述方法, 利用 Matlab 对采集到的图 7 所示运动图像进行处理, 得到的时域采样信号及其频率分布如图 8 所示. 由图中可以看出信号中有明显的频率特征, 根据此频率即可通过(1)式计算出待测的像速.

由(18)式可知, 选择较高的行频能提高信号处理精度, 但行频的选择应考虑待测像速的范围, 盲目地提高行频会由于输入行频与像移速度不匹配导致图像像移量过大, 致使图像的高频成分丧失, 影响测量的精度. 实验中采用线阵 CCD 的像素 binning 功能^[19]较好地解决了这个问题, 在保证图像高频成分不丧失的前提下大幅度地提高数据读出速率, 实现了动态累加的快速采样.

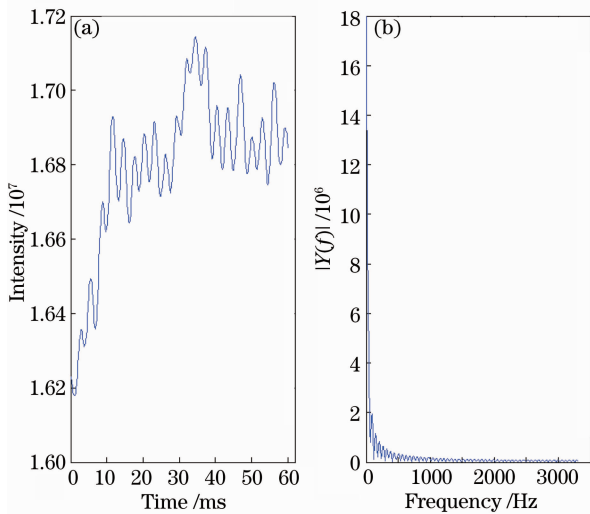


图 8 对运动图像进行采样后的(a)时域信号及其(b)频率分布

Fig. 8 (a) Sampling signal of motion image and (b) its frequency distribution

测量图 8 中采样信号的中心频率, 常用的方法有快速傅里叶变换法、过零法和希尔伯特变换法等, 这些方法各有优缺点^[20], 本实验选用过零法. 图 8 中的时域信号是频率基本确定, 振幅和相位随机的正弦波, 需设计一个窄带通滤波器, 抑制高频噪声, 去掉低频起伏, 并提高其信噪比. 带通滤波器的带宽为

$$f_B = f_g - f_d = \frac{v_g}{p} - \frac{v_d}{p}, \quad (21)$$

式中 v_g 为被测像速最大值, v_d 为被测像速最小值. 由于实验的测速范围为 $5\sim 53.2\text{ mm/s}$, 因此设计带

通滤波器带宽 $f_B=602.5\text{ Hz}$. 对于带通滤波器的输出信号, 利用 Matlab 处理软件采用过零测频法找出其过零点, 计算其频率. 求出图 8 中信号的频率为 335 Hz . 由(1)式可得像移速度测量结果为 53.6 mm/s , 依据(20)式可得实际的像移速度为 53.2 mm/s , 测量误差为 0.7% .

实验对 $5\sim 53.2\text{ mm/s}$ 范围内几个典型像速进行了测量, 并对相机曝光时间为 10 ms 时的像移量误差进行了计算, 其结果如表 1 所示.

表 1 典型像移速度测量结果及误差

Table 1 Result and error of measuring several image motion velocities

Real image motion velocity / (mm/s)	Measurement result / (mm/s)	Precision / %	Image motion error / μm
5	4.96	0.8	0.4
28.34	28.15	0.7	2
42.50	42.68	0.4	1.7
53.2	53.31	0.2	1

由表 1 可知, 测量误差引起的像移量误差最大为 $2\ \mu\text{m}$, CCD 像素尺寸为 $8\ \mu\text{m}$, 小于 $1/3\text{ pixel}$, 能够满足航空相机成像的分辨率要求.

5 结 论

提出了一种利用线阵 CCD 的空间滤波效应测量航空相机像移速度的方法, 可方便地对空间滤波器的响应进行调制, 改变其频率特性以适应不同目标频率分布的要求. 线阵 CCD 既作为空间滤波器又作为光电接收元件, 装置结构简单, 可减少安装调试的误差; 数据处理方便, 可实现动态累加快速采样. 对 $5\sim 53.2\text{ mm/s}$ 的像移速度进行了测量, 测量误差导致的像移量误差不大于 $1/3\text{ pixel}$, 能够满足航空相机像移补偿的精度要求^[21]. 提出的光学非接触式测量的新方法在工业领域和航空侦察领域将有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- 1 J. Y. Li, X. Liu. External swing method for forward motion compensation of airborne digital camera [C]. *SPIE*, 2011, **8002**: 800206
- 2 Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang. Digital implementation of forward motion compensation in TDICCD panoramic aerial camera[J]. *Optics and Precision Engineering*. , 2008, **16**(12): 2465~2472
王德江, 匡海鹏, 蔡希昌. TDICCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16** (12): 2465~2472
- 3 K. Shirai, Y. Yaguchi. Highly spatially resolving laser Doppler velocity measurements of the tip clearance flow inside a hard disk

- drive model [J]. *Exp. Fluids*, 2011, **50**(3): 573~586
- 4 M. L. Jakobsen, H. T. Yura, S. G. Hanson. Speckles and their dynamics for structured target illumination: optical spatial filtering velocimetry [J]. *J. Opt.*, 2009, **11**(5): 054001
- 5 Zhou Ying, Wei Ping. A real time image correlating speedometer based on FPGA parallel processing [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 108~110
周 瑛, 魏 平. 基于 FPGA 并行处理的实时图像相关速度计 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 108~110
- 6 Rudiger Zeitler. Digital correlator for measuring the velocity of solid surfaces [J]. *IEEE Trans. & Meas.*, 1997, **46**(4): 490~495
- 7 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712006
樊 超, 李英才, 傅洪亮. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712006
- 8 Fan Chao. Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1028002
樊 超. 离焦对光学相关法测量空间相机像移精度的影响 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1028002
- 9 J. T. Ator. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **53**(12): 1416~1422
- 10 Y. Itakura, A. Sugimura, S. Tsutsumi. Amplitude-modulated reticle constructed by a liquid crystal cell array [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(16): 2819~2826
- 11 K. Christofori, K. Michelt. Velocimetry with spatial filters based on sensor arrays [J]. *Flow Meas. Instrum.*, 1996, **17**(314): 265~272
- 12 Martin Schaeper, Nils Damaschke. Velocity measurement for moving surfaces by using spatial filtering technique based on array detectors [C]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, **6752**: 303~310
- 13 Dong Zhengchao, Klaus Michel, Swen Bergeler *et al.*. The application of CCD spacial filtering in the detection of particle velocity [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2000, **21**(2): 211~216
董正超, Klaus Michel, Swen Bergeler 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): 211~216
- 14 M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans. Particle Image Velocimetry [M]. Heidelberg: Springer, 1998
- 15 S. Mohaghegh, A. Hossein Rezaie. A convenient approach for velocity measurement [C]. Tehran: Information, Communications and Signal Processing, 2005. 339~343
- 16 S. Hosokawa, A. Tomiyama. Spatial filter velocimetry based on time-series particle images [J]. *Exp. Fluids*, 2012, **52**(6): 1361~1372
- 17 Y. Aizu, T. Asakurai. Principles and development of spatial filtering velocimetry [J]. *Appl. Phys. B*, 1987, **43**(4): 209~224
- 18 A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. Discrete-Time Signal Processing (Second Edition) [M]. Liu shutang, Huang Jianguo transl.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. 115~145
A. V. 奥本海姆, R. W. 谢弗. 离散时间信号处理 [M]. 刘树棠, 黄建国 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 115~145
- 19 Zhou Wang, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Experimental research for Binning technique in spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041604
周 望, 沈为民, 周健康. Binning 技术在光谱仪中的实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041604
- 20 Wu Chonghao, Lu Yuping, Yao Dan. An zero-crossing frequency measuring method using time-domain continuous finite impulse response filter [J]. *Power System Technology*, 2007, **31**(7): 18~21
吴崇昊, 陆于平, 饶 丹. 用时域连续有限冲激响应滤波器进行过零测频的方法 [J]. *电网技术*, 2007, **31**(7): 18~21
- 21 Yi Hongwei, Zhao Hui, Wen Desheng. Static simulation experiment of image motion measurement based on optical joint transform correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3471~3475
易红伟, 赵 惠, 汶德胜. 联合变换相关器像移测量静态仿真实验分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3471~3475

栏目编辑: 何卓铭