

文章编号: 1001-4322(2007)10-1667-04

# 扫描相机标定脉冲信号位置的确定及噪声处理\*

舒 桦, 傅思祖, 黄秀光, 马民勋, 顾 援

(中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 扫描相机标定数据处理中的一个关键问题是如何准确确定脉冲信号的位置, 实验数据的信噪比和脉冲信号位置的定义方法都会对标定结果的准确性产生影响。采用了取半高宽的方法来确定扫描相机标定脉冲信号的位置, 在信噪比较高 (大于 100) 的情况下, 该方法确定标定信号的位置可以达到亚像素水平。对于信噪比较低 (小于 10) 的实验数据, 先采用快速傅里叶变换方法对其进行滤波, 通过滤波可以极大地抑制噪声信号的影响, 然后采用“半高宽法”确定脉冲信号的位置, 最后得出可信的标定结果。当扫描相机定在 0.3 ns 的扫描档时, 通过该方法得到的扫描速度为 0.214 ps/pixel, 扫描不确定度为 0.0029 ps/pixel, 拟合线性相关系数为 0.9997。

**关键词:** 扫描相机; 标定; 快速傅里叶变换; 半高宽法; 标准具; 噪声

**中图分类号:** TH714 **文献标识码:** A

扫描相机作为一种高精度的时空分辨测量仪器。它是快速过程, 如高压激光状态方程<sup>[1-5]</sup>实验中测量冲击波渡越时间的主要工具。扫描相机中的变像管对电子束的控制非常灵活, 它可以达到很高的时间分辨本领和扫速。但是, 扫描相机扫速速度的不均匀性 (或称非线性) 是一个普遍存在的问题, 它直接影响到扫描时间的测量。因此, 扫描相机的扫速和时间分辨率要经常进行标定<sup>[6]</sup>。

扫描相机标定数据处理中的一个关键问题是如何准确地确定信号的位置, 而实验数据的信噪比和数学处理方法都会对标定结果的准确性产生比较大的影响。本文采用了一种“半高宽法”来确定标定信号的位置, 在高信噪比和低信噪比两种情况下, 该方法均能得到较高准确度的标定结果。

## 1 实验方法及结果

扫描相机扫速结果的标定需要一个时间上等间隔的稳定的脉冲序列, 理论上讲这个脉冲序列的时间间隔越小越好。但是, 由于相机本身灵敏度和时间分辨等因素, 需要选择合适的脉冲发生器, 尤其对于扫描相机快速扫描档的标定, 要求脉冲发生器有极高的重复频率和很好的稳定性。目前国内还没有重复频率和稳定性都达到标定要求的脉冲发生器, 因此, 我们用标准具对激光分光后产生的一系列强度逐渐衰减的光脉冲序列对扫描相机进行标定。标定实验的排布如图 1 所示, 标准具 (由两片距离连续可调的反射镜组成) 的两端镀有与入射激光波长对应的光反射率为  $r$  的反射膜, 激光在标准具内来回反射, 并输出一系列强度衰减的光脉冲, 由相机读出的相邻脉冲峰值时间间隔  $\Delta t = 2nd/c$ , 为常数 ( $n$  为两反射镜之间的介质折射率,  $d$  为介质厚度,  $c$  为光速)。若相机扫速呈线性, 则输出的相邻脉冲位置间隔应一致。将各个相邻脉冲之间的实际位置间隔与理想间隔相比较, 经数学处理后就得到某个扫描档的扫速。

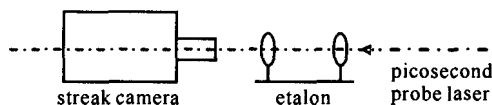


Fig. 1 Schematic of experimental setup of calibration

图 1 标定光路示意图

扫描相机慢扫速档 (5 ns) 的标定结果如图 2(a) 所示, 其中一个典型的脉冲如图 2(b) 所示。

## 2 标定脉冲信号位置的确定

要得到扫描相机的准确标定结果需要准确地测量出相邻脉冲的间隔大小, 而如何准确地定义脉冲的位置会直接影响标定结果的准确性。常用的方法是把脉冲的峰值位置定义为脉冲<sup>[7]</sup>的位置, 简称“峰值法”, 这种定义方法受噪声的影响比较大。因此, 我们采用取半高宽的方法来确定脉冲的位置, 简称“半高宽法”, 典型的单

\* 收稿日期: 2007-04-24; 修订日期: 2007-08-15

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 舒桦 (1979—), 男, 硕士, 从事激光高压状态方程的实验研究; shuhua\_79@hotmail.com.

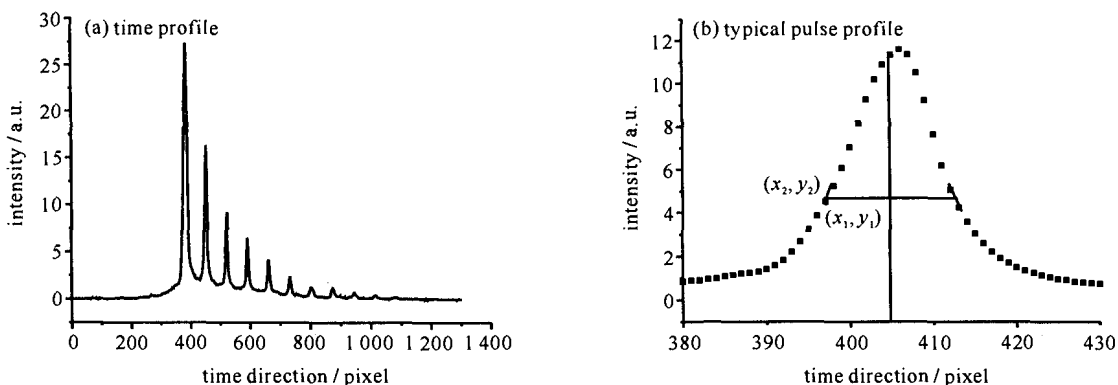


Fig. 2 Intensity vs time profile and a typical pulse profile

图 2 扫描相机标定强度的时间分布曲线和单个脉冲强度分布

个标定脉冲信号(见图 2(b)),脉冲的位置可用以下公式计算<sup>[6]</sup>

$$\bar{x} = x_1 + (x_2 - x_1) \left( \frac{\bar{y} - y_1}{y_2 - y_1} \right) \quad (1)$$

式中:  $\bar{x}$  为用内插方法得到的上升沿或者下降沿的位置;  $\bar{y}$  是脉冲峰值的一半。信号位置定义为上升沿和下降沿的一半所对应的位置。

下面比较“半高宽法”和“峰值法”定义脉冲位置时的准确性。假设有一系列脉宽  $\tau$  不同而信号中心位置都在  $x=0$  处高斯分布的信号,可表示为

$$Y(x) = Y_0 \exp(-x^2/\tau) \quad (2)$$

在没有受到噪声时,用两种方法求得的脉冲位置是一致的,都在  $x=0$  的位置。如果信号受到宽度  $\sigma$  正态分布噪声的影响,在不同信噪比下 ( $R_{sn} = Y_0/\sigma$ ) 分别用“半高宽法”和“峰值法”求脉冲信号的位置,其结果如图 3 所示。

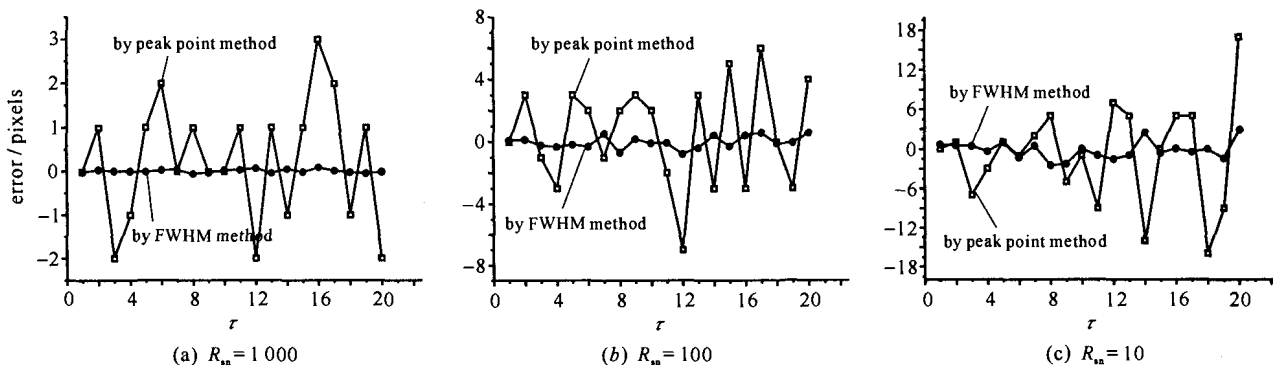


Fig. 3 Position measurement results by “FWHM” method and “Peak Point” method

图 3 不同信噪比下用半高宽法和峰值法求得的脉冲位置比较结果

从图 3 可以看出“峰值法”受噪声的影响很大,而“半高宽法”受噪声的影响比较小。在信噪比不是很差的情况下 ( $R_{sn} > 100$ ) 用“半高宽法”确定脉冲位置其误差在 1 pixel 以内。但是在信噪比很低的情况下 ( $R_{sn} < 10$ ), 用“半高宽法”也会引入较大的误差。扫描相机快速扫描档 (0.3 ns) 的标定结果如图 4 所示,其信噪比较低。在这种情况下即使用“半高宽法”来确定脉冲信号的位置也会引入较大的误差。因此需要先去噪声,然后再读取数据。

图 4 中的原始数据由有用信号叠加随机噪声。输入场分布可以表示为

$$f(x, y) = s(x, y) + n(x, y) \quad (3)$$

式中:  $s$  和  $n$  分别表示有用信号及噪声;用  $S$  和  $N$  分别表示其频谱,则

$$F(f_x, f_y) = S(f_x, f_y) + N(f_x, f_y) \quad (4)$$

只要信号与噪声在频域的分布特点不同,例如信号能

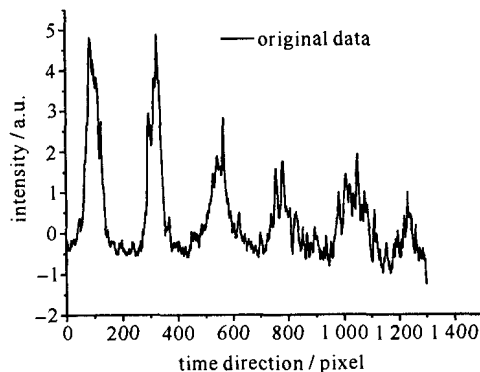


Fig. 4 Distribution of calibration intensity with time

图 4 扫描相机标定强度的时间分布曲线

量集中在某一频带,噪声能量分布在频面很宽范围,就可以采用带通滤波的方法,有效地抑制噪声,因而大大提高输出信噪比。

针对图 4 的实验结果我们采用快速傅里叶变换(FFT)<sup>[8]</sup>对实验数据进行处理。通过 FFT 变换得到图 4 中实验记录(包括信号与噪声)的谱分布,如图 5 所示。从图 5 可以看到它由一个主频和很多高频信号组成。通过滤波把高频信号滤掉就可以有效地抑制噪声。对图 4 进行高频滤波,然后进行 FFT 逆变换,得到的结果如图 6 所示,通过滤波后数据的信噪比显著提高了。与图 6 对应的扫描位置和扫描时间如图 7 所示。

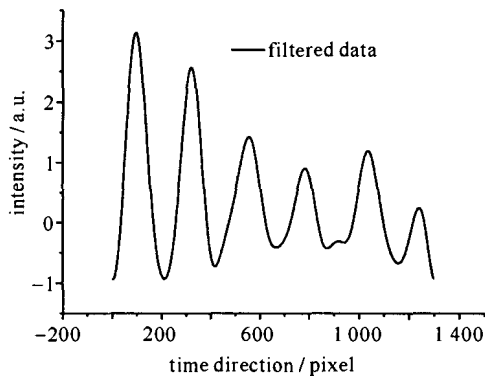


Fig. 6 Calibration intensity vs time after filter noise  
图 6 去除噪声后的实验数据

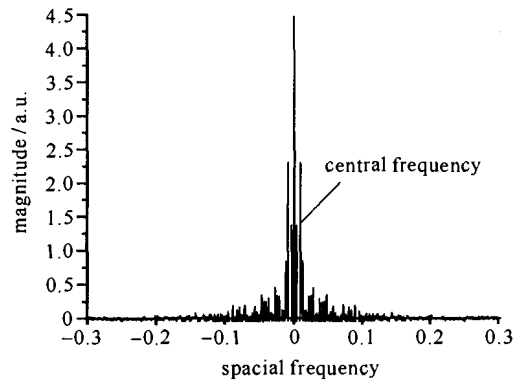


Fig. 5 Frequency spectra distribution of Fig. 4  
图 5 与图 4 对应的谱分布

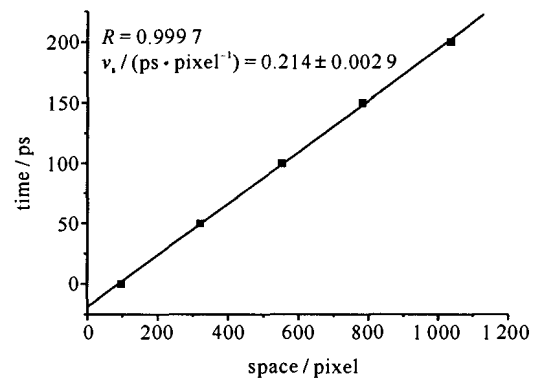


Fig. 7 Fitting curve of scanning time and image position  
图 7 0.3 ns 档扫描时间随扫描位置变换拟合曲线

图 7 的拟合结果可以得出相机的扫描速度  $v_s$  是 0.214 ps/pixel,扫速的不确定度为 0.002 9 ps/pixel,数据拟合出的线性相关系数  $R=0.999 7$ ,整个像面上扫描速度的均匀性比较好。因此,扫描相机取 0.3 ns 档时扫速线性是比较好的。

### 3 结 论

本文采用了取半高宽的方法来确定扫描相机标定脉冲信号的位置,在信噪比较高(大于 100)的情况下,该方法确定的标定信号位置可以达到亚像素的水平。对于信噪比较低(小于 10)的实验数据,采用快速傅里叶变换方法对其进行滤波,通过滤波可以极大地抑制噪声信号的影响,提高了扫描相机标定结果的精度。

### 参考文献:

- [1] 傅思祖,孙玉琴,黄秀光,等.“神光-Ⅱ”装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J].中国激光,2003,30(2):129-133.(Fu S Z, Sun Y Q, Huang X G, et al. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of “Shenguang-Ⅱ” facility. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(2):129-133)
- [2] Fu S Z, Gu Y, Wu J, et al. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO<sub>2</sub> up to 0.4 TPa[J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(9):3461-3465.
- [3] 傅思祖,黄秀光,吴江,等.利用“神光-Ⅱ”激光装置多路光束叠加直接驱动下的冲击波平面性及稳定性[J].强激光与粒子束,2003,15(6):570-573.(Fu S Z, Huang X G, Wu J, et al. Planarity and stability of shock driven directly by multi-beam laser from “Shenguang-Ⅱ” laser facility. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(6):570-573)
- [4] 舒桦,傅思祖,黄秀光,等.激光状态方程实验数据在线处理程序的开发及应用[J].高压物理学报,2006,20(3):327-330.(Shu H, Fu S Z, Huang X G, et al. A on-line program to process laser equation of state experimental data. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(3):327-330)
- [5] 舒桦,傅思祖,黄秀光,等.状态参量相关性对实验数据不确定度的影响[J].强激光与粒子束,2005,17(9):1365-1368.(Shu H, Fu S Z, Huang X G, et al. Influence of pertinence of physical parameters on uncertainty of experimental data. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(9):1365-1368)
- [6] Montgomery D S, Lerche R A, Laumann C W, et al. Evaluating the accuracy of optical-streak-camera sweep rates using uncertain data[J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63(10):4322-4326.

- [7] 黄翼翔, 江少恩, 李文洪, 等. X 光条纹相机时间性能标定[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5):829-833. (Huang Y X, Jiang S E, Li W H, et al. Temporal characteristics calibration for an X-ray streak camera. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(5):829-833)
- [8] Kreis T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method[J]. *Opt Soc Am A*, 1986, 3:847-854.

## Calibration pulse position determination and noise processing of streak camera

SHU Hua, FU Si-zu, HUANG Xiu-guang, MA Min-xun, GU Yuan

(Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A key problem in streak camera data processing is how to determine the position of the signal pulse, and the results will be effected by the signal to noise ratio(SNR) of the experimental data and the signal pulse position determination method. In the paper, FWHM(half maximum and half width) method is used to determine the single pulse position. The method could determine the signal pulse position with sub-pixel precision when the SNR more than 100 : 1. As for the data with bad signal to noise ratio(SNR less than 10 : 1), a Fast Fourier Transform method is used to filter the noise first, then the pulse position is determined by the FWHM method. And the streak camera calibration data of the super-fast sweep rate was processed. The sweep speed is  $(0.214 \pm 0.0029)$  ps/pixel. The linear dependent coefficient is 0.9997, which shows the streak camera scanning linearity is good.

**Key words:** Streak camera; Calibration; FFT; FWHM method; Etalon; Noise

※ ※ ※ ※ ※ ※

### 《强流粒子束及其应用》征订启事

强流粒子束物理与技术是 21 世纪物理学的前沿领域之一。它是国防科研深入发展和未来新概念武器的重要技术基础。本书中列出的十余个重要应用专题是国际上处于前沿的热点课题, 在国内有许多属于空白或刚刚起步。本书是曾获国防科技优秀图书二等奖的《高功率脉冲技术》的续篇, 紧密结合国内脉冲工程三大工程装置, 比现有出版物针对性更强。以工程带动学科发展, 反过来学科推动工程更进一步深化; 本书侧重于应用, 侧重于物理本质, 书中分析总结了多年研究生培养经验, 深入浅出, 重视数学推演, 但又不拘泥于数学, 从简化入手, 步步深入, 学以致用。

本书重点阐述了强流束传输、聚焦及应用中的基本物理问题, 选材于现代前沿课题, 内容新颖。适合于从事国防科研及高新技术开发的广大科技人员及研究生使用。另外《高功率脉冲技术》现已再版, 欢迎订购。

《强流粒子束及其应用》(定价 58.00 元) 及再版《高功率脉冲技术》(定价 52.00 元) 由国防工业出版社出版, 作者为刘锡三研究员, 欲订购该书, 可与国防工业出版社读者服务部联系。

联系人: 李福利、马隐茹、邢秀荣 邮购电话: 010-68428422, 68414474

地 址: 北京海淀区紫竹院南路 23 号 (邮编: 100044)

开户行: 工行北京四道口分理处

帐 号: 0200049319201076153

为了使所购图书能够顺利及时送达, 请购书单位将购书款汇入我社发行部账号的同时, 把自己的联系方式、邮书详细地址、邮编等通知我社联系人, 本地购书单位不需邮寄 (自取) 的可以按图书码洋 80% 折扣优惠, 外地购书单位需邮寄的按图书码洋 100%, 邮寄费全免。

2007 年 8 月 28 日