

文章编号: 1001—4322(2000) s1—0209—04

# 条纹相机扫速非线性标定和修正\*

夏彦文, 刘 华, 陈 波, 叶金祥, 苏春燕, 谢旭东

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 919-988 信箱 621900)

**摘 要:** 研究了条纹相机扫速非线性、动态范围等测试用标准具的精确设计方法。通过选用合适的标准具, 实验标定了 C1587 条纹相机的扫速非线性, 并采用逐点对强度修正的方法, 完成了条纹相机的扫速非线性的计算机自动修正。

**关键词:** 条纹相机; 扫速非线性; 强度修正

**中图分类号:** TN 247 **文献标识码:** A

激光脉冲时间特性是高功率激光技术和 ICF 研究的一个重要性能参数, 国内外有关高功率激光实验室均以高时间分辨的条纹相机作为主要的精密测量工具<sup>[1]</sup>。要保证时间精密测量的要求, 必须对条纹相机本身影响测试精度的各个因素(如条纹相机的动态范围、象增益的非均匀性、几何畸变等)进行分析和研究<sup>[2,3]</sup>。本文主要研究了条纹相机扫速非线性的实验标定及扫速非线性的计算机自动修正。

## 1 标准具的选择

条纹相机扫描速度的非线性将导致时间轴的畸变, 引起强度值的失真<sup>[4]</sup>。这是因为: 强度不变的脉冲光入射到系统上, 由于扫速的非线性, 将导致时间轴被压缩, 使得强度看起来增加了, 从而引入时间测量误差。为了测量扫速的非线性, 同时兼顾测量的动态范围, 我们选用了光学法进行标定。因此必须精确选择标准具, 让它产生一系列等时间间隔的脉冲。

### 1.1 标准具的厚度选择

以 C1587 条纹相机某扫速为例选择标准具。设条纹相机的扫速为每道(ch) 12.5 ps, 动态范围 100, CCD 读出系统全屏共 480 道(折合成时间约为 6 ns), 静态象半宽度为 4 道, 激光脉宽约 30 ps, 在脉冲波形不发生重叠时, 理想状态下相邻条纹的时间间隔  $\Delta t$  为

$$\Delta t = 2 \times 4 \times 12.5 \text{ ps} = 100 \text{ ps} \quad (1)$$

在此扫速下, 标准具的最小厚度  $d$  为

$$d = c\Delta t/2 = (3 \times 10^8 \times 0.1 \times 10^{-9}/2) \text{ mm} = 15 \text{ mm} \quad (2)$$

其中,  $c$  为真空中的光速, 要满足测量精度的要求, 标准具引入的误差必须小于 1%, 故间距精确到 0.1 mm 即可。

### 1.2 标准具的反射率选择

脉冲光入射到一块标准具上, 得到一系列等间隔等衰减比的光脉冲, 其每级的透射光强分别为

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2) \\ I_2 &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_1R_2 = I_1R_1R_2 \\ I_3 &= I_0(1 - R_1)(1 - R_2)R_1R_2R_1R_2 = I_1(R_1R_2)^2 \\ &\vdots \\ I_m &= I_1(R_1R_2)^{m-1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $R_1, R_2$  为标准具两表面的反射率,  $I_l (l=1, 2, \dots)$  为第  $l$  次透射的光强。

兼顾动态范围的标定, 设线性区内能看到 20 条条纹, 则有

\* 收稿日期: 2000-08-18; 修订日期: 2000-11-13  
基金项目: 国防科研基础研究基金资助课题  
作者简介: 夏彦文(1972-), 男, 助理研究员。

$$(R_1 R_2)^{19} = 1/100 \tag{4}$$

得出:  $R_1 R_2 \approx 0.88$ ,

经过以上分析, 选择的标准具两面镀波长为  $0.53\mu\text{m}$  的反射膜, 其  $R \approx 85\%$ , 最慢档标准具间距不得小于  $15\text{mm}$ 。根据实际需要, 我们设计了不同厚度的标准具, 以适应不同档位的需要。

### 2 标定实验

图 1 为条纹相机扫速非线性的实验标定示意图。实验中我们选用了一台波长为  $1.06\mu\text{m}$ , 半宽度约为  $30\text{ps}$  的 YAG 激光器作为标定光源。为了标定可见光条纹相机, 在光路上配置了 KDP 倍频器。根据扫速档位的需要, 分别选用了  $50, 100, 200, 500\text{ps}$  的标准具。通过仔细调节标准具, 可在相机上观察到一连串强度递减的脉冲序列。

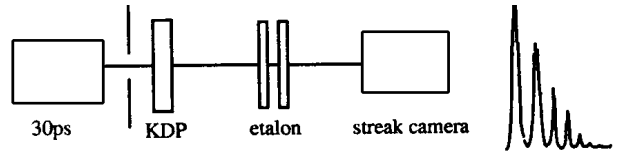


Fig 1 The schematic diagram of experimental arrangement  
图 1 标定实验示意图

由相机得出的相邻脉冲峰值时间间隔  $\Delta t = 2nd/c$  为常数 ( $n$  为介质折射率,  $d$  为介质厚度)。若相机扫速呈线性, 则输出的相邻脉冲空间间隔应一致。将各个相邻脉冲之间的实际空间间隔与理想空间间隔相比较, 经数学处理后就得到某个扫速档位的扫速非线性曲线。

### 3 条纹相机的标定数据

在 CCD 记录系统记录的同一幅条纹扫描图像中, 取脉冲强度曲线上相邻峰值通道数的中间值为横坐标参数, 相邻峰的差值为纵坐标参数 (单位  $\text{ps}$ ), 将各组数据插入进去, 得到该档位的非线性校正数据及曲线。图 2 为条纹相机某档位的实验标定数据及校正曲线。

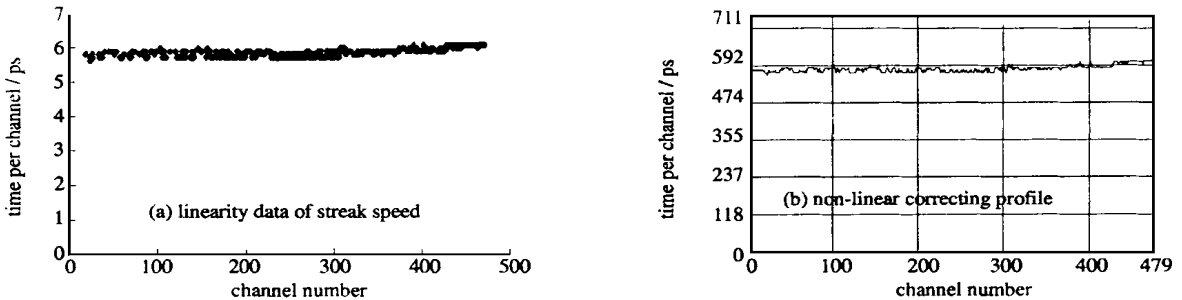


Fig 2 Linearity data of streak speed and non-linear correcting profile  
图 2 C1587 条纹相机扫速非线性数据及校正曲线

根据数据结果计算得出, 条纹相机该档位的扫速非线性为  $2.82\%$ , 而相机制造商所提供的出厂指标为  $1.4\%$ 。可见条纹相机经过长期使用后, 它的扫速线性已变差。标定数据经过数学处理后就作为条纹相机的校正数据, 为计算机自动校正作准备。

### 4 条纹相机扫速非线性的自动校正

扫描速度的非线性的校正方法有多种, 常用的方法是采用逐步求近的数学方法<sup>[4]</sup>, 它是将时间轴人为划成若干段, 然后读出每一段的时间间隔值, 在该时间间隔内取算术平均, 采用直线公式和曲线逼近等逐步求近的方法得出一个模拟的近似修正公式, 再通过程序对曲线进行修正。这种方法不能对时间轴的每一点进行修正, 拟合曲线不够精确。相机每标定一次需对程序进行修改。因此, 我们采用逐点对强度校正的方法校正条纹相机的扫速非线性。

#### 4.1 曲线校正原理

扫速非线性校正既可以校正时间轴, 也可以校正强度轴。直接对时间轴进行校正比较直观, 但势必造成 CCD 像素的分割。所以我们采用校正强度轴。

设线性校正前的强度曲线数据为  $P(i)$ , 扫速线性数据为  $S(i)$ ,  $\Delta S$  为平均扫速,  $T(i)$  为  $S(i)$  从  $j=0$  到  $j=i-1$  的总和(这里时间起点  $T(0)=0$ ), 即  $T(i) = \sum_{j=0}^{i-1} S(j)$  (见图 3(a, b))。设  $p(t)$  为真实波形(不考虑单位系数的影响), 强度曲线数据  $P(i)$  可用下式量化表达

$$P(i) = C \int_{T(i)}^{T(i)+S(i)} p(t) dt \tag{5}$$

式中  $i=0, 1, \dots$ ;  $C$  是常数, 设扫速线性校正后获得的第  $k$  道( $k=0, 1, 2, \dots$ ) 强度曲线数据为  $Q(k)$ , 则有两种情况

$$T(i) + \Delta S k < T(i+1) < T(j) + \Delta S(k+1) < T(j+1) \quad (i < j) \tag{6}$$

$$T(i) + \Delta S k < \Delta S(k+1) < T(i+1) \tag{7}$$

对(6)式(见图 3(c)), 有

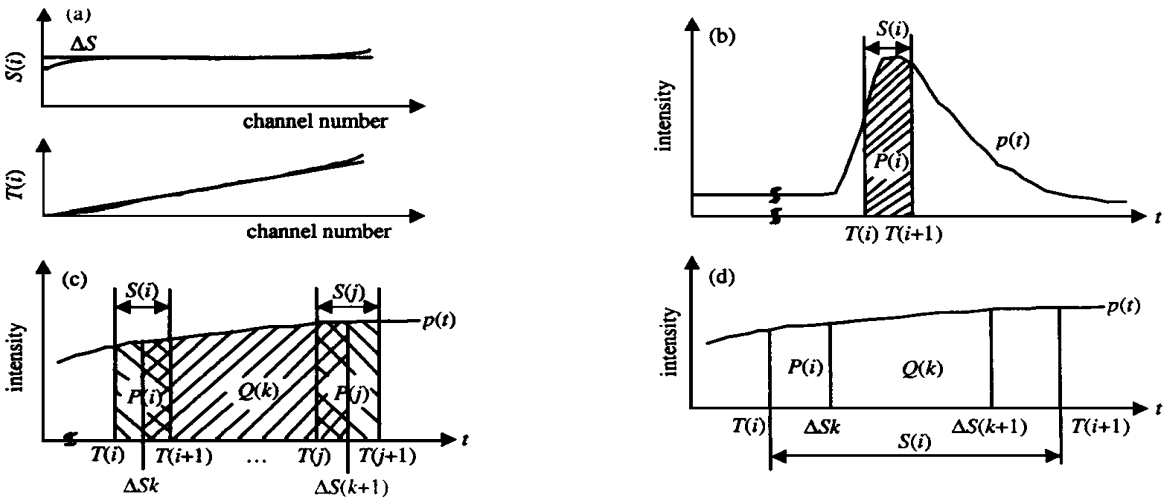


Fig 3 Diagram of principles of the linearity correction

图 3 校正原理示意图

$$Q(k) = C \int_{T(i)}^{T(i+1)} p(t) dt + \int_{T(i+1)}^{T(j)} p(t) dt + \int_{T(j)}^{T(j+1)} p(t) dt \tag{8}$$

式中忽略了  $t = T(i+1) - T(i)$  和  $t = T(j+1) - T(j)$  时段内  $p(t)$  的变化。

对(7)式(见图 3(d)), 有

$$Q(k) = C \int_{T(i)}^{T(i+1)} p(t) dt \tag{9}$$

式中忽略了  $t = T(i+1) - T(i)$  时段内  $p(t)$  的变化。

### 4 2 条纹相机扫速非线性校正结果

根据上述校正原理, 将扫速标定数据逐点按强度校正经平滑处理后, 储存于条纹相机数据处理系统中, 形成一条逐点的校准曲线, 如图 2 所示, 由计算机对每次测量结果进行自动实时修正, 即建立条纹相机扫速非线性自动修正系统。图 4 为条纹相机获取的时间间隔为 100ps 的条纹序列图及修正前后的脉冲波形。经计算知, 对 ns 量级的激光脉冲, 修正后由相机非线性带来的测试误差小于  $\pm 1\%$ 。

## 5 结果与讨论

研制了分别用于标定条纹相机不同扫速档位的标准具, 为今后定时标定条纹相机的扫速非线性提供了条件。同时根据扫速线性实测数据结果可以看出, 条纹相机经过长期使用后, 它的扫速线性已变差, 对于激光脉宽精密测量来说已不能忽略。经采用对强度逐点修正的校正方法, 数据实测处理后, 对于 ns 量级的激光脉冲, 由相机扫速非线性带来的测试误差小于  $\pm 1\%$ , 满足精密化测试的要求。由于实验采用

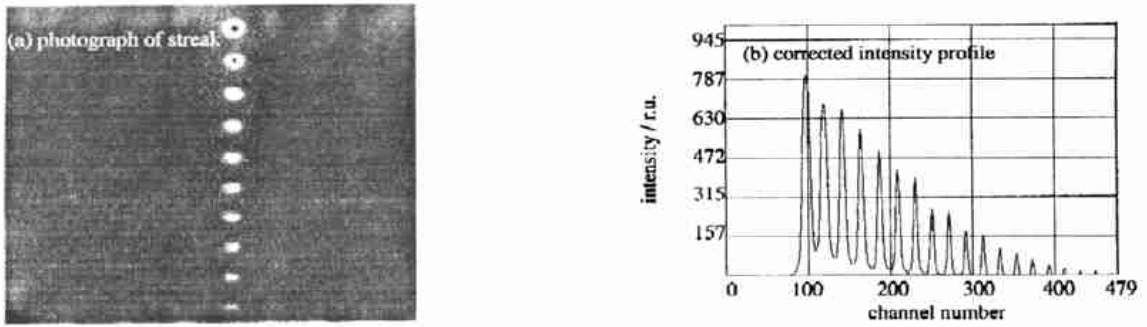


Fig 4 Streak image of a pulse train with a constant time separation 100ps and a constant reduction ratio 0.75, and corresponding intensity profile

图 4 条纹图及其强度曲线

的标定光源的脉宽过宽(30~ 50ps),对相机的快扫速档位尚无法进行标定。

### 参考文献:

- [1] Thomas SW. The LLL compact 10 ps streak camera-1974 update[A]. Proceeding of 11<sup>th</sup> International Congress on High Speed Photography[C], London, 1974: 101.
- [2] Montgomery D S, Drake R P. Flat-field response and geometric distortion measurements of optical cameras[A]. Proceeding of SPIE, High Speed Photography, Videography and Photonics[C], 1987, **832**: 283-288.
- [3] Kalibjian R, Peterson G G. Analysis of space charge in photonic tubes[J]. *J Appl Phys.* 1983, **54**(8): 4295-4301.
- [4] Tsuchiya Y, Inuzuka E, Suzuki Y, et al. Ultrafast streak camera[A]. Proceeding of 13<sup>th</sup> International Congress on High Speed Photography and Photonics, SPIE[C], 1978, **189**: 517-520.

## Calibration and correction of sweep rate nonlinearity of the streak camera

XIA Yan-wen, LU Hua, CHEN Bo, YE Jing-xiang, SU Chun-yan, XIE Xu-dong

(National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract** A method for etalon design is reported, which is used for the calibration for sweep nonlinearity of streak camera and the test of its dynamic range with appropriate etalon, and the method of intensity correction dot by dot, the sweep nonlinearity of C1587 streak camera has been calibrated and automatically corrected by computer.

**Key words** streak camera; sweep nonlinearity; intensity correction