

文章编号: 1001-1455(2012)02-0179-06

激光干涉测速中信号光纤色散测量^{*}

刘 乔, 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为对激光干涉测速系统(VISAR)中信号光纤的色散特性进行快速测量, 搭建了一种基于时域法的多模光纤色散测量装置。该装置由 532 nm 的皮秒激光器、快响应光电探测器以及宽带数字示波器组成, 通过对输入光纤前后的光脉冲时间宽度进行测量, 来获得光纤的脉冲响应 3 dB 脉宽(即色散时间)。利用该装置分别对一根长度为 123 m 的国产梯度折射率光纤以及一根 10 m 长的阶跃折射率光纤在 532 nm 波长附近的色散特性进行了测量。测得的梯度折射率光纤色散时间为(683±16) ps, 对应 3dB 频响带宽为 646 MHz; 阶跃折射率光纤色散时间为(1631±14) ps, 对应频响带宽为 271 MHz。对实验结果进行了测量不确定度分析, 并与理论计算值进行了比较, 获得了较好的一致性。研究表明, 利用该实验装置, 可对激光干涉测速应用中信号光纤的色散特性进行迅速、准确的测量, 从而为实验中信号光纤类型、长度等的合理选用提供参考。

关键词: 爆炸力学; 色散测量; 时域法; 多模光纤

中图分类号: O384

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

激光干涉测速技术(VISAR)中常使用多模光纤来将激光传输到目标靶面并把包含被测目标速度信息的漫反射光传输回干涉仪中进行干涉与检测。采用光纤传光能够克服空气扰动对测量的影响, 可使系统全天候工作, 并且传输路径灵活可变、易于实现多点测量^[1]。但在使用信号光纤传输带有速度信息的反射激光过程中, 由于多模光纤的模间色散限制了信号传输带宽, 将造成干涉信号的对比度下降, 并使测量系统的时间分辨率受到限制, 严重时还可能导致实验的失败^[2]。因此, 信号光纤的色散特性是激光干涉测速技术应用中需要重点考虑的一个影响因素, 对其进行迅速、准确的测量具有重要意义。

目前用于光纤色散测量的方法主要分为时域测量^[3-4]和频域测量^[5]2 类, 其中时域法测量原理简单, 结果直观, 适合于多模光纤的色散特性测量。本文中介绍了一种基于时域法的多模光纤色散测量装置, 分析了测量原理, 并利用该装置对 2 种实用的国产多模光纤的色散时间和频响带宽进行了实验研究。本工作可为激光干涉测速系统中信号光纤的色散特性测量提供一种简便、可靠的手段。

1 基本原理及实验布局

1.1 基本原理

光纤色散是由于不同成分的光信号(不同模式或不同频率等)在光纤中传输时, 因群速度不同产生不同的时间延迟而引起的一种物理效应, 主要包括模间色散和模内色散 2 类。色散带来的直接影响就是光纤内传输光信号的时间展宽和波形畸变, 因此对光纤色散的评估经常采用光信号的脉冲时间展宽来描述。对多模光纤而言, 模间色散是引起脉冲展宽的主要因素。模间色散产生于同一频率的光波以不同模式在光纤中传输时由于群速度不同引起的时间延迟, 由几何光学理论容易得到阶跃折射率多模光纤和梯度折射率光纤的模间色散估算公式分别为

$$\Delta\tau_s = \frac{Ln_1(n_1 - n_2)}{cn_2} = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 - \text{NA}^2}} - 1 \right) \approx \frac{Ln_1\Delta}{c} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2010-10-23; 修回日期: 2011-09-09

作者简介: 刘 乔(1973—), 男, 博士研究生, 副研究员。

$$\Delta\tau_g = \begin{cases} \frac{Ln'_1\Delta^2}{2c} & \alpha = 2 \\ \frac{Ln'_1\Delta(\alpha-2)}{c(\alpha+2)} & \alpha \neq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: c 为真空中光速, L 为光纤长度, n_1 和 n_2 分别为阶跃折射率光纤的纤芯折射率和包层折射率, NA 为阶跃折射率光纤数值孔径, Δ 为纤芯和包层之间相对折射率差, 有 $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, 对于梯度折射率光纤而言, Δ 指最大相对折射率差, n'_1 为梯度折射率光纤的中心折射率, α 为梯度折射率分布形状指数, 其理论最佳值为 2。由式(1)~(2)可知, 模间色散与光纤长度成正比, 且与光纤折射率分布有关, 通过改善光纤芯径折射率分布, 梯度折射率光纤的色散特性较阶跃折射率光纤获得了大幅提高。

目前测量多模光纤模间色散主要采用时域法, 即利用窄脉冲光激励光纤, 直接测量光脉冲在光纤输入、输出端的波形来获得光纤的色散特性。用该方法既可测得光纤中的总色散也可对某一类色散进行分离测量, 另外, 用时域法结合快速傅立叶变换还可获得光纤的频率响应特性(即频响带宽)。下面给出时域法测量光纤色散的基本原理。

S. D. Personick 已证明, 就多模光纤而言, 其对光功率的响应可视为一个准线性系统^[6], 即光纤输入和输出端光脉冲功率间的关系可表示为

$$P_{out}(t) = h(t) * P_{in}(t) \quad (3)$$

式中: “*” 代表卷积运算, $P_{in}(t)$ 和 $P_{out}(t)$ 分别为光纤输入和输出端光脉冲时间波形, $h(t)$ 为系统的脉冲响应。光纤色散展宽的时域测量, 实际上就是对脉冲响应函数 3dB 脉宽的测量。由于直接利用式(3)求 $h(t)$ 涉及解卷积, 运算较为繁琐, 考虑到大多数情况下, 脉冲响应函数及输入光脉冲波形可近似为理想高斯函数, 则脉冲响应与输入、输出光脉冲的 3dB 脉宽间有如下简单关系

$$\tau_{3dB,h} = \sqrt{\tau_{3dB,out}^2 - \tau_{3dB,in}^2} \quad (4)$$

式中: $\tau_{3dB,h}$ 为脉冲响应的 3dB 脉宽, $\tau_{3dB,in}$ 和 $\tau_{3dB,out}$ 分别为输入、输出光脉冲的 3dB 脉宽。

在线性系统中, 频率响应 $H(f)$ 与脉冲响应 $h(t)$ 间满足傅立叶变换关系

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (5)$$

由于时域的卷积相当于频域的乘积, 故由式(3)有

$$H(f) = \frac{P_{out}(f)}{P_{in}(f)} \quad (6)$$

式中: $P_{in}(f)$ 和 $P_{out}(f)$ 分别对应输入、输出光脉冲时域波形的傅立叶变换。当 $h(t)$ 为高斯函数时, $H(f)$ 也为高斯函数, 容易得到 $h(t)$ 的 3dB 脉宽 $\tau_{3dB,h}$ 与频域 3dB 光带宽 f_{3dB} 间的关系

$$f_{3dB} = \frac{2\ln 2}{\pi} \frac{1}{\tau_{3dB,h}} \approx \frac{0.4413}{\tau_{3dB,h}} \quad (7)$$

1.2 实验布局

设计的多模光纤色散测量装置如图 1 所示。首先激光器输出一个短脉冲激光, 由分束器分成 2 束, 一束作为参考光, 经自由空间传输后由一个快响应光电探测器接收; 另一束经光纤耦合器耦合进待测多模光纤, 再由另一个同型号光电探测器接收; 最后用一台宽带数字示波器同时记录 2 个光电探测器的输出。从示波图上可直接测得输入、输出光脉冲的时间波形及他们对应的 3dB 脉宽, 再利用式(4)、(7)即可得到待测光纤的色散时间和频响带宽。由于色散测量不要求激光与光纤的耦合效率, 因此测

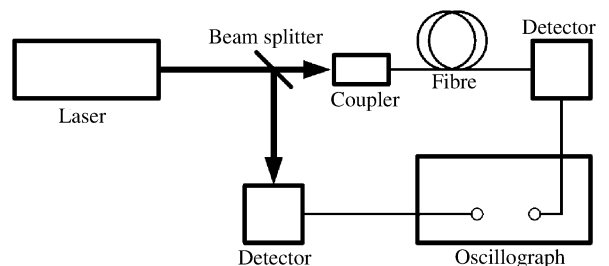


图 1 时域法测光纤色散实验布局

Fig. 1 Experimental setup for dispersion measurement of optical fiber by time domain method

量中光纤耦合器选用了一块数值孔径大于被测光纤数值孔径的会聚透镜,以保证测量满足所谓的“满注入”条件。

考虑到目前 VISAR 系统中使用的是 532 nm 激光,因此实验中激光器采用了立陶宛 EKSPLA 公司生产的 SL300 系列激光器,其输出波长为 532 nm,脉宽为百皮秒量级。光电探测器采用响应时间为 30 ps 的快响应探测器,示波器则采用最大采样率为 20 GS/s 的宽带数字示波器。为使实验更具针对性,被测光纤选择了在实际 VISAR 系统中常用的阶跃折射率和梯度折射率 2 类光纤进行研究。首先对一根原始长度为 123 m 的大芯径梯度折射率光纤进行了测量,再测量了一根 10 m 长(VISAR 测试中使用的标准光纤长度)的阶跃折射率光纤。为减少由随机影响造成的测量不确定度,每根光纤的测量都在复现性条件下重复了 10 次。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

图 2 为某次实验测得的光脉冲输入光纤前后的典型信号波形,从图中可明显看出光纤色散带来的脉冲展宽效应。

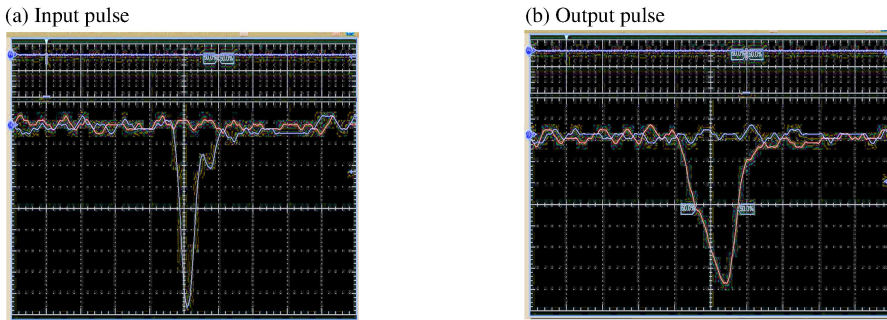


图 2 输入被测光纤前后的光脉冲波形

Fig. 2 Waveforms of the optical pulses in and out the measured fiber

表 1 中给出了 123 m 长的梯度折射率光纤和 10 m 长的阶跃折射率光纤的色散测量实验数据。

表 1 123 m 长的梯度折射率光纤和 10 m 长的阶跃折射率光纤的色散测量实验数据

Table 1 Experimental data of dispersion measurement of the 123-m-length gradient index fiber and the 10-m-length step index fiber

| 实验号 | $\tau_{g,in}/ps$ | $\tau_{g,out}/ps$ | $\tau_{s,in}/ps$ | $\tau_{s,out}/ps$ |
|-----|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 278 | 723 | 285 | 1 669 |
| 2 | 276 | 765 | 279 | 1 650 |
| 3 | 277 | 737 | 282 | 1 655 |
| 4 | 288 | 740 | 286 | 1 665 |
| 5 | 287 | 742 | 284 | 1 646 |
| 6 | 285 | 734 | 285 | 1 650 |
| 7 | 281 | 739 | 280 | 1 662 |
| 8 | 282 | 725 | 278 | 1 644 |
| 9 | 283 | 738 | 281 | 1 657 |
| 10 | 285 | 748 | 283 | 1 648 |
| 平均值 | 282 | 739 | 282 | 1 655 |

将表 1 中测得的输入光脉宽 $\tau_{g,in}$ 和输出光脉宽 $\tau_{g,out}$ 的平均值 282 ps 和 739 ps 代入式(4),可得到 123 m 长的梯度折射率光纤色散时间的最佳估计值为 683 ps,再由式(7)能够得到相应的频响带宽为 646 MHz。同理,由表 1 可得到 10 m 长的阶跃折射率光纤色散时间最佳估计值为 1 631 ps,相应频响带宽为 271 MHz。

另外,如本文 1.1 节所指出,式(4)是将脉冲响应函数和光脉冲波形近似为理想高斯函数得到的,为验证这种近似法在本实验中的准确性,又用式(5)、(6)采用傅立叶变换的方法对频域响应的 3dB 带宽进行了直接计算。选用 123 m 长的梯度折射率光纤实验结果中的一次测量值(表 1 中实验号为 3 的)作为傅立叶变换法的处理对象,首先由示波器测得的输入、输出光脉冲时间波形计算出对应的傅立叶变换,再用式(6)计算出频响函数 $H(f)$ 并绘制出图形,从而得到 3dB 基带频率响应带宽。用该方法测得的 f_{3dB} 约为 641 MHz,与用高斯函数近似法得到的 646 MHz 相对误差仅为 0.77%,从而证实了这种近似方法的可靠性。傅立叶变换法处理结果如图 3 所示。

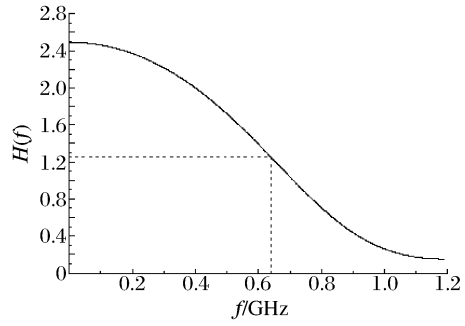


图 3 被测光纤的频率响应

Fig. 3 Frequency response of the measured fiber

2.2 分析及讨论

首先对实验测量结果的不确定度进行分析。本实验中不确定度的来源主要有以下几方面:(1)测量仪器有限分辨力带来的不确定度;(2)测量仪器重复性引起的不确定度;(3)激光器输出光脉冲宽度的随机起伏及波形变化引起的不确定度;(4)测量过程中环境振动、温度变化等引起的不确定度。

测量仪器有限分辨力带来的不确定度可用 B 类标准不确定度进行评定。实验中光电探测器的时间分辨力为 30 ps,可将该值视为置信区间的宽度,则单次测量的标准不确定度为其半宽度除以 $\sqrt{3}$,对于 10 次测量的算术平均值而言,由探测器分辨力引入的 B 类标准不确定度为

$$u_{\text{det}} = \frac{0.5 \times 30 / \sqrt{3}}{\sqrt{10-1}} = 2.9 \text{ ps}$$

示波器的时间分辨力设为 50 ps,同样可得由示波器引入的 B 类标准不确定度为

$$u_{\text{osc}} = \frac{0.5 \times 50 / \sqrt{3}}{\sqrt{10-1}} = 4.8 \text{ ps}$$

由测量仪器重复性、激光器输出光脉冲宽度的随机起伏和波形变化以及测量过程中环境振动、温度等的随机变化引起的不确定度均可包含在 A 类标准不确定度评价中。由贝塞尔公式有

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中: u_A 为 A 类标准不确定度, x 为输入量, \bar{x} 为 n 次独立测量的算术平均值。

将表 1 中的实验数据代入式(8)可算得梯度折射率光纤输入、输出光脉冲宽度测量的 A 类标准不确定度分别为 $u_{A,g,in} = 1.3 \text{ ps}$ 和 $u_{A,g,out} = 3.7 \text{ ps}$,阶跃折射率光纤输入、输出光脉冲宽度测量的 A 类标准不确定度分别为 $u_{A,s,in} = 0.87 \text{ ps}$ 和 $u_{A,s,out} = 2.7 \text{ ps}$ 。

最后进行合成标准不确定度的评定。首先对输入、输出光脉冲宽度测量不确定度进行分别合成。对于梯度折射率光纤情况,有

$$u_{c,g,in} = \sqrt{u_{\text{det}}^2 + u_{\text{osc}}^2 + u_{A,g,in}^2} = 5.8 \text{ ps}, \quad u_{c,g,out} = \sqrt{u_{\text{det}}^2 + u_{\text{osc}}^2 + u_{A,g,out}^2} = 6.7 \text{ ps}$$

对于阶跃折射率光纤情况,有

$$u_{c,s,in} = \sqrt{u_{\text{det}}^2 + u_{\text{osc}}^2 + u_{A,s,in}^2} = 5.7 \text{ ps}, \quad u_{c,s,out} = \sqrt{u_{\text{det}}^2 + u_{\text{osc}}^2 + u_{A,s,out}^2} = 6.2 \text{ ps}$$

考虑到输入、输出光脉冲宽度间的相关性,合成标准不确定度 u_c 可表示为

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (9)$$

式中: N 为输入量个数,在本实验中为 2, f 为被测量与输入量之间的函数关系,相当于式(4)和(7), u

(x_i, x_j) 为输入量的估计协方差,与相关系数 $r(x_i, x_j)$ 间满足如下关系

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (10)$$

由式(10)可算出梯度折射率光纤以及阶跃折射率光纤输入、输出光脉冲宽度测量值的相关系数分别为 $r(\tau_{g,in}, \tau_{g,out}) = -0.11$ 和 $r(\tau_{s,in}, \tau_{s,out}) = -0.41$ 。再由式(9)可得他们各自的合成标准不确定度分别为 $u_{c,g} = 7.9$ ps 和 $u_{c,s} = 6.8$ ps。相应的扩展不确定度为 $U_g = 2u_{c,g} = 16$ ps 和 $U_s = 2u_{c,s} = 14$ ps。

根据上述测量不确定度分析,最终测量结果可表示为:梯度折射率光纤色散时间为 (683 ± 16) ps,阶跃折射率光纤色散时间为 $(1\ 631 \pm 14)$ ps。

下面再将实验结果和理论计算值进行比较。实验中被测阶跃折射率光纤参数为:纤芯折射率 $n_1 = 1.453$,数值孔径 $NA = 0.37$,光纤长度 $L = 10$ m;被测梯度折射率光纤参数为:中心折射率 $n'_1 = 1.456$,相对折射率差 $\Delta = 0.014$,折射率分布形状指数 $\alpha = 2.34$,光纤长度 $L = 123$ m。将上述各参数分别代入式(1)、(2)可得: $\Delta\tau_s = 1\ 651$ ps, $\Delta\tau_g = 655$ ps。与测量值比较可知,梯度折射率光纤测量值和理论值之间相对误差为 4.1%,阶跃折射率光纤为 1.2%,测量值和理论值取得了较好的一致性。

最后对本实验系统的测量性能进行简要分析。设 $\Delta\tau$ 为输入、输出光脉冲宽度的差值,则由式(4)有

$$\tau_{3dB,} = \sqrt{(\tau_{3dB,out} - \tau_{3dB,in})(\tau_{3dB,out} + \tau_{3dB,in})} = \sqrt{(\Delta\tau)^2 + 2(\Delta\tau)\tau_{3dB,in}} \quad (11)$$

从式(11)可知,系统所能测得的 $\Delta\tau$ 越小、测量所用的激光脉宽越窄,则测量的灵敏度越高。 $\Delta\tau$ 的测量灵敏度可认为等于探测系统(包括光电探测器和示波器)的时间分辨力,设光电探测器的响应时间为 Δt_{det} ,示波器的采样时间为 Δt_{osc} ,则探测系统的时间分辨力

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_{det})^2 + (\Delta t_{osc})^2} \quad (12)$$

考虑到本实验中光电探测器的响应时间为 30 ps,示波器的响应时间为 50 ps,可得 $\Delta t = 58$ ps,再取 $\tau_{3dB,in} = 282$ ps,代入式(11)可得色散时间的测量下限约为 190 ps。要提高色散测量的灵敏度,可采用更高时间分辨力的探测器或更短的激光脉冲。

另外,系统可测的光纤长度也是有限的,主要取决于所用示波器的记录长度。在本实验中,当采样率为 20 GS/s 时,示波器的有效记录长度为 25 k,对应记录时间为 1 250 ns,考虑通常多模光纤的时间延迟约为 5 ns/m,则可测的最大光纤长度为 250 m,这完全满足 VISAR 测试的实际应用需要。

3 结 论

搭建了一种基于皮秒激光器、快响应光电探测器以及宽带数字示波器的光纤色散时域测量装置,分别对一根 123 m 长的梯度折射率光纤和一根 10 m 长的阶跃折射率光纤在 532 nm 波长附近的色散特性进行了测量,对实验结果进行了不确定度分析,并与理论计算值进行了比较,获得了良好的一致性。研究表明,利用该实验装置,可对激光干涉测速应用中信号光纤的色散特性进行迅速、准确的测量,从而为实验中信号光纤类型、长度等的合理选用提供参考。

参考文献:

- [1] 李泽仁,李幼平,马如超,等. 光纤传输速度干涉仪[J]. 爆炸与冲击,1994,14(2):175-181.
LI Ze-ren, LI You-ping, MA Ru-chao, et al. Velocity interferometer with fiber transmission[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(2):175-181.
- [2] 李泽仁. 激光干涉测速中信号光纤的模式色散对速度测量的影响[J]. 爆炸与冲击,2005,25(5):457-460.
LI Ze-ren. The influence of the modal dispersion of signal fiber on velocity measurement in VISAR applications[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):457-460.
- [3] Takahashi S, Ichimura K. Time domain measurements of launching condition dependent bandwidth of all plastic

optical fibers[J]. *Electronics Letters*, 1991,27(3):217-219.

- [4] Meier J, Lieber W, Heinlein W. Time-domain bandwidth measurements of step-index plastic optical fibers[J]. *Electronics Letters*, 1987,23(22):1208-1209.
- [5] Yoshimura T, Takahashi S, Koyamada Y. Modal baseband response measuring methods for plastic optical fibers [C]// *Proceedings of 27th European Conference on Optical Communication*, 2001:24-25.
- [6] Personick S D. Baseband linearity and equalization in fiber optic digital communication systems[J]. *Bell System Technical Journal*, 1973,52(7):1175-1194.

Dispersion measurement of signal optical fibers in VISAR*

LIU Qiao, LI Ze-ren

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: To measure the dispersion of the signal optical fibers in VISAR, a setup was built based on the time domain method. The setup is made up of a picosecond laser, a fast-response photodetector and a broadband digital oscilloscope, which can afford the 3dB duration of the impulse response function by measuring the optical pulse durations in and out the measured fiber. This setup was used to characterize the dispersion properties of a 123-m-length gradient index fiber and a 10-m-length step index fiber at about 532 nm, respectively. The obtained dispersion time of the gradient index fiber is (683 ± 16) ps and the corresponding frequency response 3dB bandwidth is about 646 MHz. These of the step index fiber are (1631 ± 14) ps and 271 MHz, respectively. Uncertainty analysis of the measured results was performed, and the measured results were compared with the theoretical calculations. It displays that the measured results are consistent with the theoretical calculations. The built setup can afford a simple and dependable dispersion time measurement for the signal optical fibers in VISAR applications, thereby it can provide reference for reasonably choosing the type and length of the signal optical fibers in experiments.

Key words: mechanics of explosion; dispersion measurement; time domain method; multimode fiber

* Received 23 December 2010; Revised 9 September 2011

Corresponding author: LIU Qiao, cysral_palace@163.com