

文章编号: 1000-5773(2002)03-0237-04

光纤带宽特性对 VISAR 测试影响的分析^{*}

彭其先, 马如超, 李泽仁, 刘 俊, 刘元坤, 邓向阳

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 对多模光纤的带宽特性进行了分析, 发现阶跃折射率光纤的带宽只能做到数兆赫·千米, 而梯度折射率光纤的带宽可达数吉赫·千米。对光纤传输 VISAR 中的测试信号进行了讨论, 认为阶跃折射率光纤的带宽已限制了 VISAR 测试系统的时间分辨本领。提出用渐变折射率光纤代替阶跃折射率光纤, 可以有效地减小带宽对 VISAR 测试的限制, 从而提高系统的频带响应特性。

关键词: 带宽; VISAR; 光纤

中图分类号: O521.3

文献标识码: A

1 引 言

广泛应用于冲击波物理与爆轰物理研究领域的 VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) 测试技术, 可对高速运动事件进行非接触的连续性测试, 研究冲击与爆轰状态下材料的特性^[1,2]。

随着 VISAR 的发展, 现代光纤技术也被引入该测试技术中, 从最初的用光纤输入系统代替光学元件输入系统^[3], 到现在的全光纤 VISAR^[4], 使 VISAR 仪器不仅在设计上大为改观, 而且在原理上也有了较大的突破。

目前, VISAR 测试技术的发展着眼于测试精度的提高, 表现在努力提高仪器的灵敏度和测试记录系统的能力方面, 从而在信号记录时表现为很高的时间分辨本领, 以期完全记录下高频的干涉信号, 解决 VISAR 测试中的条纹丢失问题。如用扫描相机代替光电倍增管^[5], 可使系统的时间分辨率达到皮秒量级。

而在此过程中, 有一个问题可能被忽视, 即光纤的带宽特性。

最初将光纤引入 VISAR 测试系统, 只是出于设计方便上的考虑, 未对光纤的带宽特性加以注意。随着系统时间分辨率的提高, 特别是在达到纳秒甚至皮秒量级的时间测试时, 光纤的时间色散, 即光纤的带宽特性, 就必须加以考虑, 特别是 VISAR 中作为传输光能的功能型光纤, 一般采用多模光纤结构, 与通信中普遍使用的单模光纤相比, 带宽性能更差, 更应该注意。

2 多模光纤带宽特性分析

在多模光纤中, 不同模式光波的群速度不一样, 因此到达光纤接受端的时刻也不相同, 从而引起光脉冲展宽, 导致光纤带宽降低。由光线理论分析可以认为, 这是由各种光线轨迹沿轴向传输时的光程不

^{*} 收稿日期: 2001-07-27; 修回日期: 2001-10-31

作者简介: 彭其先(1970—), 男, 硕士, 工程师。

同而引起的。这也是多模光纤中的主要色散,文中就此进行讨论。

2.1 阶跃光纤的脉冲展宽

在如图 1 所示的阶跃光纤中,以子午光线为例,能引起最大时间差的两种光线是,光线 1(平行于轴线入射的光线)与光线 2(以临界角入射的光线)。由于它们传光路径的不同,最后在到达光纤输出端时将造成时间差,使叠加后的脉冲展宽。

脉冲的展宽计算如下式

$$\tau_D = \frac{L(NA)^2}{2cn_1} \quad (1)$$

式中: τ_D 为光线 1 与光线 2 到达输出端面的时间

差, L 为光纤长度, NA 为光纤的数值孔径, n_1 为纤芯的折射率, c 为真空中的光速。

由(1)式可见,阶跃光纤多模之间色散引起的脉冲展宽与光纤的长度成正比,与光纤数值孔径的平方成正比。以石英光纤为例, $n_1=1.47$,在实际使用中,数值孔径为 0.37,代入(1)式求得

$$\tau_D = 155 \text{ ns/km}$$

相应带宽为

$$f_D = 1/\tau_D = 6.45 \text{ MHz} \cdot \text{km}$$

2.2 渐变折射率光纤的脉冲展宽

理论分析表明,当渐变型光纤纤芯的折射率,沿半径方向呈抛物线分布时,不同模式的光线在光纤内传输的轴向速度近似为常数。渐变光纤中的模间色散如图 2 所示。

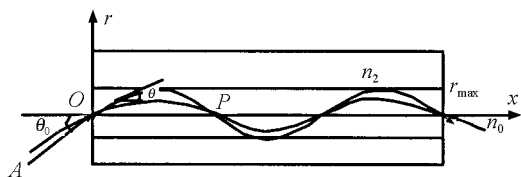


图 2 渐变光纤中的模间色散

Fig. 2 Chromatic dispersion in index-graded optical fiber

实际中,因光纤中的非子午光线的螺旋传播方式、光纤的工艺等因素,不可能完全保证折射率的抛物线分布,渐变型光纤中的模间色散仍然存在,并用以下公式进行估算^[6]

$$\tau_D = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{n(0)L}{c} \Delta^2, & (\epsilon = 2) \\ \frac{\epsilon - 2}{\epsilon + 2} \frac{n(0)L}{c} \Delta, & (\epsilon \neq 2) \end{cases} \quad (2)$$

同样以石英光纤为例, $n(0)=1.47$,在实际使用中,数值孔径为 0.27, $\Delta=0.017$, $\epsilon=2$ 和 $\epsilon=2.22$ 时,代

入(2)式分别求得

$$\tau_D = \begin{cases} 0.708 \text{ ns/km}, & (\epsilon = 2) \\ 4.340 \text{ ns/km}, & (\epsilon = 2.22) \end{cases}$$

相应带宽为

$$f_D = 1/\tau_D = \begin{cases} 1.412 \text{ GHz} \cdot \text{km}, & (\epsilon = 2) \\ 0.230 \text{ GHz} \cdot \text{km}, & (\epsilon = 2.22) \end{cases}$$

由此可见,渐变型光纤的带宽特性比阶跃光纤好得多,高出近 2 个量级。实际中现有商业化渐变折射率光纤的带宽大于 400 MHz · km(先锋公司产品)。

3 光纤有限带宽对 VISAR 测速的限制

采用光纤作为传输光能的 VISAR 测试系统,其系统时间特性可分为系统本机、记录系统和光纤三部分的带宽特性。

3.1 系统本机带宽

VISAR 本机的时间响应,即仪器中两光支路的相对时间延迟 τ 。目前使用的 VISAR 条纹常数在 $100 \sim 2000 \text{ m/s/Fr}$ 间,相应时间延迟 τ 为 $2.66 \sim 0.133 \text{ ns}$ (工作波长 532 nm),此即系统本机的时间分辨本领,对应的带宽为 $0.376 \sim 7.519 \text{ GHz}$ 。

3.2 记录系统带宽

目前,在 VISAR 中一般采用光电倍增管探测干涉信号,并由示波器记录。从实际使用的光电倍增管考虑,有国产 GDB-55 和日本 H6780 两种型号,其上升时间分别为 2.5 ns 和 0.78 ns ,一般认为其时间分辨本领为上升时间的 $1.5 \sim 3$ 倍,若保守地取 3 倍,则两种管型的时间分辨本领分别为 7.5 ns 和 2.34 ns ,相应的带宽为 133 MHz 和 427 MHz 。

示波器的带宽可以这样计算: 500 MHz 采样率时,其采样时间间隔为 2 ns ,对于 VISAR 中干涉产生的余弦信号,为保证记录信号的完整性,至少需要 5 个以上的取样点,因而其响应带宽为 100 MHz 。

3.3 光纤带宽

在实际使用中,光纤长度一般在 10 m 左右,考虑到光路的来回,由光纤决定的带宽应按 20 m 计算。阶跃光纤以(2.1)节计算的石英光纤为例,其 20 m 带宽为 323 MHz 。渐变折射率光纤以(2.2)节计算的结果为例,其 20 m 带宽为 11.5 GHz ($\epsilon=2.22$)。

从以上分析可以看出,系统本机由于可采用不同的测量档,相应的带宽可在较大的范围内调节,因而对系统的带宽特性不构成约束。真正制约系统带宽特性的是记录系统和光纤。

记录系统目前通过采用快上升前沿的光电倍增管和高采样率的数字式示波器,能有效地提高系统的带宽,但比较有限。H6780 是我们目前使用的上升前沿较快的光电倍增管,数字式示波器目前已有采样率达 10 GHz 的产品,但综合起来看,记录系统的带宽也不超过 H6780 所决定的 427 MHz 。

目前实验中使用的光纤一般为大数值孔径的阶跃型折射率光纤,按以上计算,带宽为 323 MHz ,并且随着光纤使用长度的增加和加工工艺的偏差而进一步减小,应该说是目前制约整个系统的一大因素。实际测试结果如图 3 所示,采用 H6780 光电倍增管,VISAR 本机条纹常数为 100 m/s/Fr ,数字式示波器的采样率分别为 500 MHz (图 3(a))和 1 GHz (图 3(b)),不考虑光纤带宽时,按以上分析,系统带宽分别为 100 MHz 和 200 MHz 。但实际信号的最高频率基本相同,均小于 100 MHz ,并有条纹丢失发生。分析认为,这主要是光纤带宽限制所致。

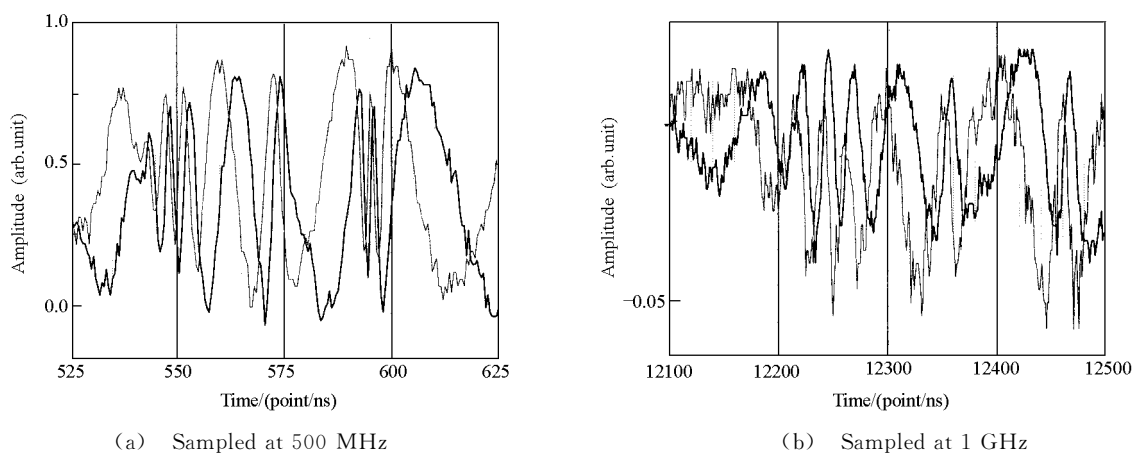


图3 不同采样率下的高频 VISAR 信号

Fig. 3 High-frequency VISAR signals with different sampling rates

解决光纤带宽问题,按以上的讨论,采用渐变折射率光纤应该是最好的途径。特别是随着光电探测系统时间响应的提高,包括采用扫描相机代替光电倍增管和示波器记录系统,此时记录系统的带宽达到 10 GHz 左右是较容易的。若再使用带宽在 100 MHz 左右的光纤,显然是不合适的。而采用渐变折射率光纤也就是必然选择。

4 结 论

对多模光纤的带宽特性进行了分析,认为光纤频带特性是目前制约 VISAR 测试的一大因素,提出了用渐变折射率光纤代替现有的阶跃折射率光纤,可以减小光纤频带特性对 VISAR 测试的限制。在提高 VISAR 系统时间分辨本领和记录系统频率响应特性的同时,这一点也应该重视。

参考文献:

- [1] Barker L M, Hollenbach R E. Laser Interferometer for Measure High Velocities of Any Reflecting [J]. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669—4675.
- [2] Sweatt W C, Stanton P L, Crump O B. Simplified VISAR System [R]. SAND-90-2419C, 1990.
- [3] Li Zeren, Li Youping, Ma Ruchao, et al. Velocity Interferometer with Fiber Transmission [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 175—181. (in Chinese)
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.
- [4] Peng Qixian, Tan Hua, Wang Wei, et al. Surface Velocity Measurment Using All-Fiber VISAR [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(2): 141—145. (in Chinese)
彭其先, 谭 华, 王 为, 等. 全光纤 VISAR 在动高压中的测量技术探索 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(2): 141—145.
- [5] Hemsing W F. VISAR: Interferometer Quadrature Signal Recording by Electronic Streak Camera [A]. Pro of the 8th Symposium on Detonation [C]. Albuquerque, NM, 1985, 468—472.
- [6] Zhang Dekun, Ao Faliang, Zou Chuanyun. Principles of Optical Fiber Communication [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1992. 25—26. (in Chinese)
张德琨, 敖发良, 邹传云. 光纤通信原理 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992. 25—26.

THE BANDWIDTH OF OPTICAL FIBER AND ITS RESTRICTIONS ON VISAR

PENG Qi-xian, MA Ru-chao, LI Ze-ren, LIU Jun,
LIU Yuan-kun, DENG Xiang-yang

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The effects of the optical fiber bandwidth on VISAR system were investigated. It was estimated that the index-stepped multi-mode optical fiber could only reach a bandwidth of several MHz · km while the index-graded optical fiber could easily reach a bandwidth of several GHz · km. The experimental results confirmed that the index-stepped optical fiber did restrict the time resolution of VISAR due to its limited bandwidth. So using the index-graded optical fiber, instead of the index-stepped fiber, may be an effective way to free the VISAR from the restriction of optical fiber bandwidth and advance the VISAR system.

Key words: bandwidth; VISAR; optical fiber