

## 对激光通过光纤后的空间相干性的研究

董孝义 盛秋琴 张建忠 宋文涛

(南开大学现代光学研究所)

**提要:** 本文从简化的理论分析和对多模光纤模斑图样的对比度测定, 可确知光纤中传输激光的空间相干特性, 并给出一种测量多模光纤后空间相干性的方法。

### Experimental research on spatial coherence of laser light passing through a multimode fiber

Don Xiaoyi, Sheng Qiuqin, Zhang Jinzhong, Song Wentao

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin)

**Abstract:** The average spatial coherent characteristics of laser light transmitting through a multimode fiber may be determined by means of measuring the contrast of speckle patterns projected from a multimode fiber, and a method for measurement of characteristics of laser light passing through a multimode fiber is given.

近年来, 由于相干光通信和光纤传感等方面的开发和发展, 迫切需要了解对激光通过光纤导波介质时相干特性及其变化规律。以往对激光相干度的测量多数是借助干涉物进行的<sup>[1]</sup>。本文给出一种利用模斑测量激光空间相干度的原理和测量方法。

#### 一、原 理

所谓光学相干性是对光场扰动之间关联性的一种描述。习惯上将其分为时间相干性和空间相干性, 前者用于描述光场在时间上的关联性, 它与光源的有限频率带宽直接相关; 后者则用于描述光场在空间上的关联性, 它与光源的有限空间线度直接发生关系。描

述光场相干性的量为复相干度  $\tilde{\gamma}_{12}(\tau) = \tilde{\gamma}(s_1, s_2, \tau)$ , 它包含空间和时间的两重成分。当光源为激光源, 具有交叉谱纯时, 时间相干性和空间相干性可以区分开来, 即有

$$\tilde{\gamma}(s_1, s_2, \tau) = \tilde{\gamma}(s_1, s_2) \cdot \tilde{\gamma}(\tau),$$

并且当光场在具有波导色散的光纤中传播时, 这种特性可近似保持下来<sup>[2]</sup>, 因此我们可以分别研究激光通过光纤时的空间相干性和时间相干性。关于时间相干性问题最近已有较多研究<sup>[3]</sup>, 这里我们主要分析激光通过光纤时的空间相干特性。

对于多模光纤, 相干光以多种导波模式传播, 它们在包层和芯子的界面上均产生多次反射形成子波, 并在纤端相干迭加, 形成一

收稿日期: 1987年5月11日。

具有随机空间强度分布的光场, 其结构呈颗粒状, 称之为散斑或模斑。显然, 这种散斑结构特性和通过光纤的激光相干特性之间存在某种联系。现将光纤芯子与包层的界面看作是漫反射面, 并分成  $N$  个部分, 令每个面元上光场强度相同, 并使面元足够小, 以致可以认为面元内各点是完全相干的。假定散斑场  $M$  处的光场为  $F_M$ , 它应是漫射面元各点对  $M$  点的贡献之和, 即

$$F_M = \sum_j^N E_j e^{i\delta_{jM}}, \quad (1)$$

其中  $E_j$  是面元  $j$  的光场强度,  $\delta_{jM}$  为  $M$  点上光场  $E_j$  的相位。因此  $M$  点处的光强可以写成

$$\begin{aligned} I_M &= \langle F_M \cdot F_M^* \rangle \\ &= \sum_j^N \sum_k^N \langle E_j \cdot E_k^* \rangle e^{i(\delta_{jM} - \delta_{kM})} \\ &= \sum_j^N \sum_k^N |E_j| \cdot |E_k| \tilde{\gamma}_{jk} e^{i(\delta_{jM} - \delta_{kM})}, \quad (2) \end{aligned}$$

根据假设, 有  $|E_j| = |E_k| = a$ ,  $\tilde{\gamma}_{jk}$  为空间复相干度, 描述面元  $j$  和面元  $k$  间的相干性, 可写成

$$\tilde{\gamma}_{jk} = |\tilde{\gamma}_{jk}| e^{i(\varphi_j - \varphi_k)},$$

将其代入(2)式, 得

$$I_M = a^2 \sum_j^N \sum_k^N |\tilde{\gamma}_{jk}| e^{i(\varphi_{jM} - \varphi_{kM})}, \quad (3)$$

式中  $\varphi_{jM} = \varphi_j + \delta_{jM}$ ,  $\varphi_{kM} = \varphi_k + \delta_{kM}$ , 均在  $0 \sim 2\pi$  内等概率随机分布。由(3)式进一步得

$$\begin{aligned} I_M &= a^2 \sum_j^N |\tilde{\gamma}_{jj}| e^{i(\varphi_{jM} - \varphi_{kM})} \\ &\quad + a^2 \sum_{j \neq k}^N |\tilde{\gamma}_{jk}| e^{i(\varphi_{jM} - \varphi_{kM})}. \quad (4) \end{aligned}$$

根据假设,  $|\tilde{\gamma}_{jj}| = 1$ , (4)式第二项反映不同面元之间的相干性, 可用平均空间相干度  $p$  近似代之, 于是得到

$$I_M = (1-P)I_0 + a^2 P \sum_j^N \sum_k^N e^{i(\varphi_{jM} - \varphi_{kM})}, \quad (5)$$

式中  $I_0 = Na^2$ 。令

$$U = I_M - (1-P)I_0, \quad (6)$$

观察(5)式, 显然有

$$U = Pa^2 \sum_j^N \sum_k^N e^{i(\varphi_{jM} - \varphi_{kM})}. \quad (7)$$

因为相位  $\varphi_{jM}$  等概率分布, 故  $U$  的空间概率分布为

$$P(U) = \frac{1}{I_0 P} e^{-U/I_0 P}, \quad (8)$$

因此可得

$$\bar{U} = \int_0^\infty U P(U) dU = I_0 P, \quad (9)$$

$$\bar{U}^2 = \int_0^\infty U^2 P(U) dU = 2I_0^2 P^2. \quad (10)$$

由(6)式得

$$\bar{U} = \overline{I_M - (1-P)I_0} = \bar{I}_M - I_0 + PI_0,$$

此式与(9)式比较, 不难看出

$$\bar{I}_M = I_0. \quad (11)$$

进一步求出

$$\bar{U}^2 = \overline{[I_M - (1-P)I_0]^2} = \bar{I}_M^2 - I_0^2 + P^2 I_0^2,$$

此式与(10)式比较, 不难看出

$$\bar{I}_M^2 - I_0^2 = P^2 I_0^2, \quad (12)$$

由此可得

$$P = \left[ \frac{\bar{I}^2 - (\bar{I})^2}{(\bar{I})^2} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

式中  $\bar{I}^2$  和  $(\bar{I})^2$  分别为模斑光强的均方值和方均值, 故  $\bar{I}^2 - (\bar{I})^2 = \text{Var}(I)$  为其方差值。可见, 此式右端即为模斑图样的对比度。因此得出结论: 利用模斑的对比度可确定通过光纤的激光的相干特性, 而前者是可以通过实验测量的量。常规的方法是光电空间扫描法, 即借助光电探测器扫描模斑场, 分别求出  $(\bar{I})^2$  和  $[\bar{I}^2 - (\bar{I})^2]$ 。显然, 这种测量的速度较慢。但是, 考虑到在平稳光场情况下, 传输光纤产生的模斑分布作为一种统计系综应该是各态历经的, 就是说, 模斑的系综分布和局部空间分布的统计特性是相同的, 空间的统计特性与时间的统计特性是等效的。因此上述测量方法可改变为时间范畴的测量方法。具体做法是, 将待测光纤的局部一有限线段作人为的微振动(例如将其置于机械振子上, 合理选择振幅和频率, 以保证光纤在振动时不产生形变和扭曲), 借此完成各态的置换, 不同时刻测得考察点的光强亦即系综中不同微观态时考察点的光强, 由此得到的时

域信号便可很容易地送至微机处理,“实时”给出测量结果。如采用 CCD 器件或转镜,也可完成空时转换,并通过微机对信号处理得到更精确的结果,但在简便程度上和经济上均不如前者。因此微振光纤方法仍有实际意义。

## 二、实 验

实验装置如图 1 所示。其中光源为单纵模 He-Ne 激光器,也可使用输出稳定的半导体激光器,经耦合透镜使激光进入待测光纤,为使光纤中模功率迅速达到稳态分布,在光纤始端接入扰模器,这对比不同长度传输光纤的相干特性是必要的。在扰模器之后将光纤的一段与振子联动,其振动频率与幅度均由一信号源控制可调。将光纤末端置于匹配液(我们使用的是甘油,其折射率与光纤芯子折射率近似相等)之中,以克服光纤输出端面对测量结果的影响。匹配液器皿的端面研磨抛光,激光从中输出后经一耦合镜将一模斑图像投射到光电倍增管(PMT)的端面上。在 PMT 前置有针孔屏,这样可使 PMT 对模斑的一点进行取样测量,并把所得时域信号送至微机处理。也可用 CCD 器件将信号送至微机处理,显然在相同条件下,后者具有更快的测量速度和更高的测量精度,但对微机的要求也相应提高。微机将输进信号按(13)

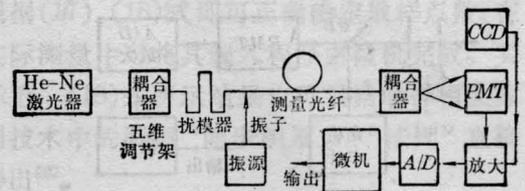


图 1 实验装置原理图

式处理,并将结果打印输出。

用该实验装置我们对国内几个厂家生产的光纤及同一种光纤的不同长度进行了测量,测量结果如表 1、表 2 所示。从中不难看出,芯径不同的光纤在长度相同的情况下,空间相干度下降程度略有不同。一般来说,当光纤的数值孔径(N. A.)相同时,芯径越大,空间相干度下降越多。对于同一种光纤(阶跃型光纤),随着光纤传输距离加长,空间相干度有逐渐下降的趋势,但比时间相干度下降的缓慢<sup>[2,3]</sup>。这种变化趋势与文献[1,2,4]等使用其他测量方法得到的结果大体相符。

## 三、讨 论

### 3.1. 测量系统的非线性及其校正

在实际测量中使用的光电倍增管(PMT)、放大器、A/D 转换板等均为非线性器件,因此对测量的准确性和可靠性有很大影响。为了解决这一问题,应先对系统进行非线性校正,方法如下:图 2(a)中的  $P_2$  可固定出射光的偏振方向,使在调节光强过程中不至改变

表 1

光 纤	N. A.	光纤芯径	P (三次测量平均值)	平均误差
$N_0.1$	0.22	50 $\mu\text{m}$	0.911	0.7%
$N_0.2$	0.22	80 $\mu\text{m}$	0.904	0.6%
$N_0.3$	0.21	300 $\mu\text{m}$	0.900	0.6%

表 2

光纤长度 (m)	25	50	250	350	400	450	500	600
P (三次测量平均值)	0.940	0.935	0.910	0.910	0.885	0.885	0.880	0.870

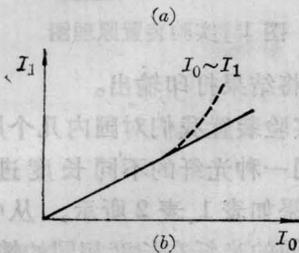
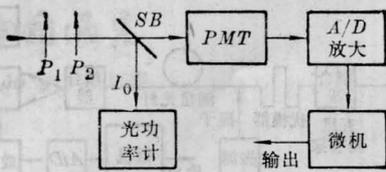


图 2

分束器(SB)的分束比;而 $P_1$ 的方向可调,调节其方向即可得到不同的光强,并可由标准光功率计和测量系统分别给出相应值,例如 $I_0$ 和 $I_1$ 值,如图2(b)所示,二者为非线性关系。为了使之呈现线性关系,可使用非线性放大器进行预校正<sup>[5]</sup>;也可以将这种校正关系编入计算程序,这样由计算机直接给出经校正后的结果(程序略)。图2(b)中虚线所示即为校正后的结果,表1、2给出的数据均为校正后的值。

如果采用CCD作空时转换器进行测量,非线性校正问题则不存在,这是采用CCD的优越之处。但这时对模斑图像的稳定性提出较高要求,一般需将系统置于防震台上方可得到较好的测量重复性。

### 3.2 模间延迟的影响

文献[6]及[1,2]等均得出结论:仅当光纤传输中模间延迟大于光源的相干时间时,空间相干性方有显著变化。用我们上面给出的简单物理模型不难对此作出证明。以阶跃光纤为例,若确知模斑场总能量中各孔径角所贡献的能量分布,即可较容易地求出模的平均可见度。为简化分析,假定分布是这样的:相邻波串到达测量点 $M$ 的间隔相等。令光源的相干时间为 $\tau_0$ ,对应的波串长度则为 $l_0 = \tau_0 c / n_f$ , $n_f$ 为光纤芯子折射率。若对 $M$

点有贡献的诸成分间最大程差为 $\Delta L$ ,则不难得到

$$P = \begin{cases} \frac{l_0}{\Delta L} - \frac{1}{3} \left( \frac{l_0}{\Delta L} \right)^2, & \Delta L > l_0, \\ 1 - \frac{1}{3} \frac{\Delta L}{l_0}, & \Delta L < l_0. \end{cases} \quad (14)$$

对于多数光纤 $N.A. = 0.22$ , $\Delta L = n_f (\sec \theta_M - 1)L \approx 0.05L$ , (14)式则为

$$P \approx \begin{cases} \frac{20l_0}{L} - \frac{1}{3} \left( \frac{20l_0}{L} \right)^2, & \Delta L > l_0, \\ 1 - \frac{L}{60l_0}, & \Delta L < l_0. \end{cases} \quad (15)$$

由于 $l_0 \approx cn_f' / n_f (n_f - n_f') \delta_f$ , $n_f'$ 为包层折射率, $\delta_f$ 为激光谱宽,当使用He-Ne激光器时, $\delta_f \approx 1.5 \text{ GHz}$ ,对于弱波导光纤,则有 $l_0 \approx 10^2 \text{ (m)}$ ,因此条件 $\Delta L \leq l_0$ 变为 $L \leq 20l_0 \approx 2 \times 10^3 \text{ (m)}$ ,可见我们测量的实际范围属于 $\Delta L < l_0$ 区域。图3中对理论计算(实线)与实际测量(虚线)进行了比较,可看出,二者随光线长度 $L$ 的变化规律大体相符,而且这种变化趋势与文献[1,4,6]等给出的结果也大体相仿。

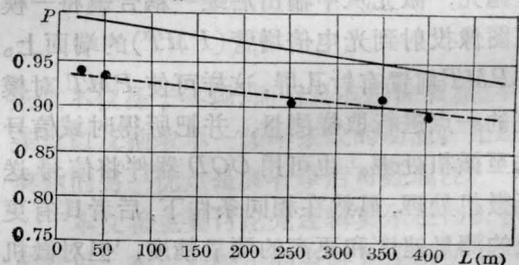


图 3

如上所述,模斑图样与模间相位( $\delta_j$ )紧密相关,引起模间相位变化的因素很多,例如光纤的机械变形、光源的不稳定等。因此,这里给出的实验系统经某些改动后即可用于光纤传感、激光光源特性参数的测定<sup>[7]</sup>等。由于模斑的随机变化导致模噪声,因此这种方法还可用于对光纤中模噪声分析<sup>[6]</sup>以及其他一些有关参数的测定等。

### 3.3 取样点数的选择

令模斑图像的带宽为 $W$ ,根据Nyquist

取样定理, 取样时间间隔则应大于  $\tau_0 = 1/2W$ , 因此取样点数应选  $N_1 \geq N_0 = 2W$ 。由此可知, 当取样点数为  $N$  时, 实际测量的相对误差应为

$$\Delta \propto N_0/N \propto N^{-1}. \quad (16)$$

对于多模光纤,  $N_0$  可视为模斑总数, 它与多模光纤容纳的模数成正比, 一般可写成如下形式<sup>[8]</sup>:

$$N_0 = \pi \left( \frac{2a}{\lambda} \right)^2 (n_f^2 - n_c^2) \simeq 2\pi \left( \frac{2a}{\lambda} \right)^2 \Delta n, \quad (17)$$

其中  $a$  为纤径,  $\Delta n = n_f - n_c$  为光纤芯子 ( $n_f$ ) 与包层 ( $n_c$ ) 折射率之差。由振动光纤取样 (包括扫描取样) 实际上是在一维上进行的, 因此实际取样点应为  $N^{1/2}$ , 故 (16) 式改写为

$$\Delta \propto N^{-1/2}. \quad (18)$$

根据 (17)、(18) 式即可正确确定取样点数, 在实际测量中可将其编入程序由微机完成。实际上, (18) 式所示结果也可根据取样相关探测技术中的所谓“同步积累  $N^{1/2}$  法则”直接得出<sup>[9]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 Дедловский М М. *Радиотехника и электроника*, **25**, 481 (1980)
- 2 Абдуллоев С С. *Квант. электр.*, **12**, 157 (1985)
- 3 董孝义 *et al.* 中国激光, (待发表)
- 4 Takahara H. *Opt. Acta*, **29**, 441 (1982)
- 5 董孝义. 应用激光, **2**(3), 6 (1982)
- 6 Erwoth R E. *Laser Focus*, **17**(9), 109 (1981)
- 7 Spano P. *Opt. Commun.*, **23**, 265 (1980)
- 8 董孝义. 物理, **15**, 439 (1986)
- 9 董孝义编著. 光波电子学, 第六章, 南开大学出版社, 1987

## 千瓦 CO<sub>2</sub> 激光器将应用于汽车发动机缸体激光淬火生产线

长春第一汽车制造厂应用中国科学院上海光机所研制的千瓦 CO<sub>2</sub> 激光器, 进行了汽车发动机汽缸淬火的新工艺试验。实践证明, 这项新工艺不仅能提高汽缸耐磨性能, 使汽缸运行寿命从几万公里提高到 20 余万公里, 而且去掉了汽缸的附加套缸, 节省了贵重材料, 是一项实用价值很高、经济效益显著的新技术。

1988 年 7 月 27 日, 长春第一汽车制造厂与中

国科学院上海光机所在上海正式签订了“建立汽车发动机缸体激光淬火生产线的全面技术合作”的协议, 并签订了包括八套 CO<sub>2</sub> 激光器 (输出功率 1800W) 及相应导光系统, 电控系统的全面合作的合同, 以组建激光淬火生产线。这是上海光机所组织激光产业开发以来, 首次与大型企业联合, 把高技术产品用于我国汽车工业技术改造上的一大成果。

(文萍)