

文章编号: 0253-2239(2001)02-181-05

联合变换相关器在光纤检测中离焦影响的讨论*

刘 卫 刘艳格 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

摘要: 对联合变换相关器在光纤检测中离焦采集谱问题进行了理论分析、计算机模拟以及光纤缺陷检测实验。得出了离焦距离与相关峰值的关系曲线; 示出了对不同相似程度的输入物的离焦谱和焦面谱两种情况下进行相关的计算机模拟结果; 提供了在焦面上和离焦一定范围两种情况下缺陷程度不同的光纤的相关检测结果。

关键词: 联合变换相关; 傅里叶变换; 离焦谱; 焦面谱; 光纤

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

1966 年 Weaver 和 Goodman 提出利用光学方法实现两个函数的卷积运算^[1], 这种联合变换相关器由于具有无须制作和精确复位复空间滤波器的优点, 一经出现就发展成为光学图像识别中最重要的—类方法, 现在, 它已广泛地应用于字符识别^[2]、文献检索^[3]、指纹识别^[4]、军事目标识别和跟踪^[5]等领域。

光学处理器具有并行、快速和大容量的优点, 而计算机具有运算速度快、精度高和灵活性强的特点, 将两者相结合进行处理的光电混合的图像识别方法具有很大的潜力。文献[6]提出了一种用光电混合的联合变换相关器实现光纤缺陷检测的方法。该方法是将被 He-Ne 激光扩束准直后照射到物面上, 经傅里叶透镜得到联合变换频谱, 用 CCD 接收联合功率谱后经图像卡输入到计算机中, 最后由计算机完成傅里叶逆变换得到相关输出。应用的关键技术是保证 CCD 能接收到足够多的谱信息, 因此 CCD 的分辨率和尽量使谱的强度低于 CCD 的饱和灵敏度是两个主要问题。文献[6]采用了稍微偏离透镜焦面采集谱的办法。但离焦的范围应该多大及对相关结果有何影响没作讨论。本文对此从理论分析、计算机模拟及光纤缺陷检测实验三个方面进行了讨论。

2 理论分析

如图 1 所示, 设 P_1 面的光场分布为 $f(\xi, \eta)$ 则

应用菲涅耳 - 基尔霍夫理论得到 P_2 面的光场分布:

$$g(\alpha, \beta) = C \{ [f(\xi, \eta) \circledast h_f(\xi, \eta)] \times T(x, y) \} \circledast h_l(x, y), \quad (1)$$

其中, C 是比例常数, \circledast 表示卷积运算, $l = f + d$, f 为透镜焦距, d 为离焦距离, $h_f(\xi, \eta)$ 和 $h_l(x, y)$ 是相应的空间脉冲响应,

$$T(x, y) = C_1 \exp \left[-i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right]$$

是透镜的相位变换函数。将(1)式写成积分形式为:

$$g(\alpha, \beta) = C \iint_{S_1} \iint_{S_2} \exp \left[i \frac{k}{2} \Delta \right] dx dy f(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{l} [(\alpha - x)^2 + (\beta - y)^2] + \\ & \frac{1}{f} [l(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 - (x^2 + y^2)] = \\ & \frac{1}{f} \left[(v^2 x - v^2 \alpha - v^2 \xi)^2 - \xi^2 \left(\frac{1-v}{v} \right) - \right. \\ & \left. 2\alpha\xi + (v^2 y - v^2 \beta - v^2 \eta)^2 - \right. \\ & \left. \eta^2 \left(\frac{1-v}{v} \right) - 2\beta\eta \right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $v = f/l$ 。将(3)式代入(2)式得:

$$\begin{aligned} g(\alpha, \beta) = & C \iint_{S_1} f(\xi, \eta) \exp \left[-i \frac{k}{2f} \left(\frac{1-v}{v} \right) (\xi^2 + \eta^2) \right] \times \\ & \exp \left[-i \frac{k}{f} (\alpha\xi + \beta\eta) \right] d\xi d\eta \times \\ & \iint_{S_2} \exp \left\{ i \frac{k}{2f} [(v^2 x - v^2 \alpha - v^2 \xi)^2 + \right. \\ & \left. (v^2 y - v^2 \beta - v^2 \eta)^2] \right\} dx dy. \end{aligned} \quad (4)$$

* 国家自然科学基金(69877011)资助项目。

收稿日期: 1999-09-06; 收到修改稿日期: 1999-11-12

当 S_2 无限扩展时, 后一积分收敛于一个复常数。因此有:

$$g(\mu, \nu) = C_1 \iint_{S_1} f(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{ik}{2f} \frac{(1-\nu)}{\nu} (\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[-\frac{ik}{f} (\alpha\xi + \beta\eta)\right] d\xi d\eta \quad (5)$$

若令

$$f'(\xi, \eta) = f(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{ikd}{2f^2} (\xi^2 + \eta^2)\right],$$

则(5)式表示 $f'(\xi, \eta)$ 的傅里叶变换, 频率为 $\mu = \alpha/\lambda$ 和 $\nu = \beta/\lambda$ 。因此, 离焦所得到的谱相当于把物函数乘上一个与坐标有关的相位因子后的傅里叶变换。

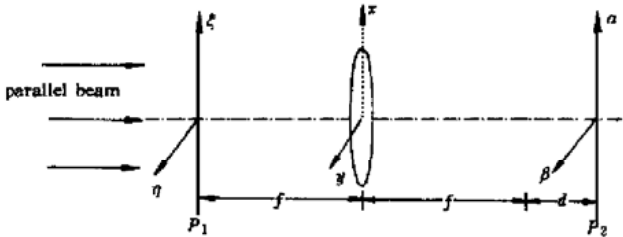


Fig. 1 Schematic of off-focus optical system

3 计算机模拟

为了清楚地了解离焦采集谱对联合变换相关输出结果的影响情况, 用计算机对简单的输入物函数进行了模拟实验。

图 2 是所用的几个输入物。首先以如图 2(a) 所示的两个长条为输入的参考图像和目标图像, 进行联合变换相关。设离焦距离 $d = f/N$, 其中 $N > 0, f$ 为所用傅里叶透镜的焦距。取 $g = 4 \text{ mm}, h = 0.5 \text{ mm}, f = 300 \text{ mm}, \lambda = 6.328 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 数据大小为 256×256 。 N 取不同值, 利用(5)式可求得与 N 对应的联合变换相关的输出函数, 然后求得一侧互相关峰的峰

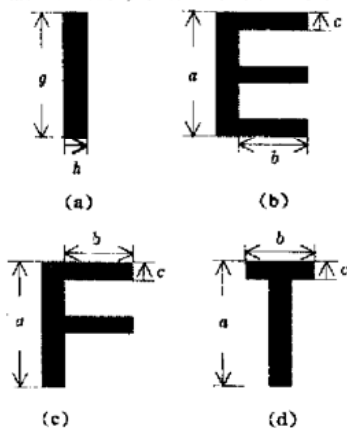


Fig. 2 Inputs for computer simulation

值, 接着以 N 为横轴, 相关峰值为纵轴画出曲线如图 3 所示。从左到右的三条曲线依次是参考图像和目标图像之间的距离分别取 1.2 和 3 时得到的。每条曲线是 N 从 10 到 150 以 10 为间隔共取 15 个点画出的。其中, 与 N 轴平行的虚线是焦面谱相关得到的相关峰值。

由图中的曲线可以看出, 随着 N 值的增大, 即离焦量 ($d = f/N$) 的变小, 相关峰向焦面谱得到的峰值 (73.383) 逼近。参考图像与目标图像之间的距离越近, 得到同一相关峰值的离焦量越大 (例如, 图中相关峰为 70, 三条曲线对应的 N 值从右到左依次减小, 即所对应的离焦量依次增大)。也就是说, 如果要求一定范围离焦量的相关输出的相关峰与严格联合变换相关的相关峰之间的误差不能低于一定数值 (如本模拟实验峰值为 70 时, 误差为 4.61%), 那么, 参考图像与目标图像的距离越近, 满足要求的离焦范围越大。事实上, 从图中三条曲线可看出, 当离焦量小于一定值时 (如图中 $N > 100, d < f/100$ 时) 离焦得到的相关输出峰值与在焦面上得到相关输出峰值的差距已经相当小了。

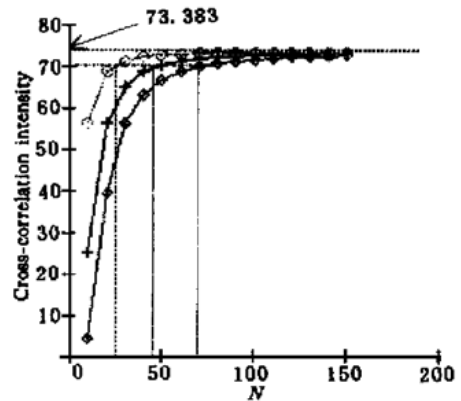


Fig. 3 The relation curves between cross correlation intensity and N

图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 是参考图像和目标图像分别为图 2 中 EE、EF 和 ET 焦面谱得到的相关输出。图 4(d)、图 4(e)、图 4(f) 分别是对应的离焦谱的相关输出。其中, $a = 4 \text{ m}, b = 1 \text{ m}, c = 0.5 \text{ m}, \lambda = 6.328 \times 10^{-4} \text{ mm}, f = 300 \text{ mm}, N = 80$, 两物间的距离为 3, 所用数据大小为 256×256 。图中各相关输出是对中间直流项归一化后的结果, 图中标有各相关峰的数据。从图中看出, 离焦谱得到的相关输出除相关峰值比相对应的焦面谱得到的相关峰值稍微低一些之外, 其它性能参数 (如相关峰的位置, 峰值半宽度等) 基本没变。对相似程度不同的物同样有很好的识别能力。而且若想减小离焦谱与焦面谱的相关输出峰值的误差, 只要增加 N (减小离焦量) 即可。

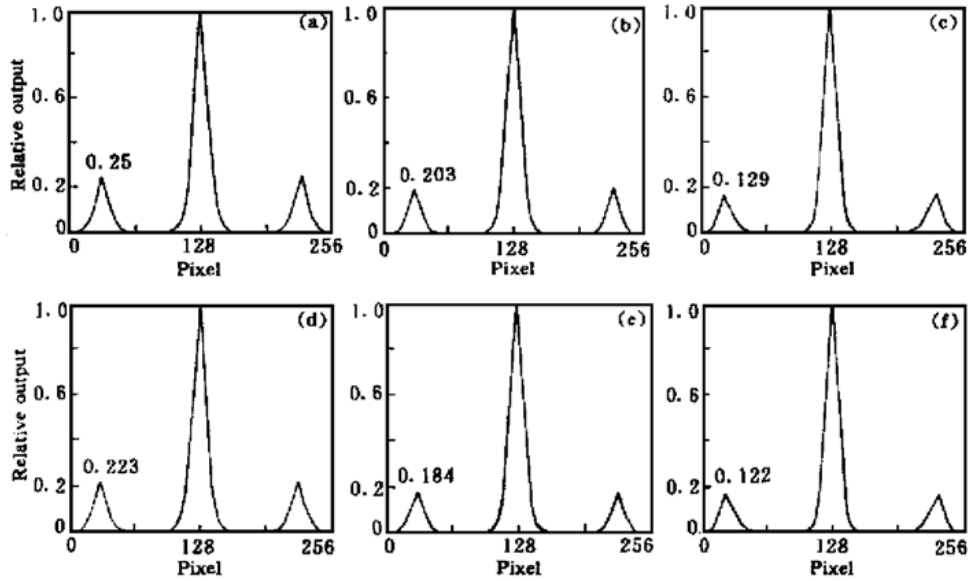


Fig. 4 Simulated results using different input objects: (a) ,(b) and (c) is the correlation output of EE ,EF and ET in focus plane respectively, (d) ,(e) and (f) is the correlation output of EE ,EF and ET in off focus plane respectively

4 光纤缺陷检测系统描述

图 5 给出了一种光电混合光纤相关检测系统的实验装置。He-Ne 激光被扩束准直成直径约 10 mm 的平行光,然后照射到输入面上。输入面内开一宽 4 mm 高 10 mm 的窗口。在窗口内,参考光纤被水平固定,待检测光纤与之平行地被放在一小槽内,由一自动位移控制系统进行间歇的进给控制并通过输入

面内的采样窗口。参考光纤与待测光纤之间的距离为 3 mm。从两光纤透射的光经过一个焦距为 300 mm 的傅里叶变换透镜,然后在透镜的后焦面上得到参考光纤和待检测光纤的联合变换频谱,由 CCD 接收将其转化为联合功率谱,再经图像卡采集到计算机中,然后由计算机完成滤波、傅里叶逆变换以及取阈操作等分类处理工作,最后实现光纤的缺陷检测。

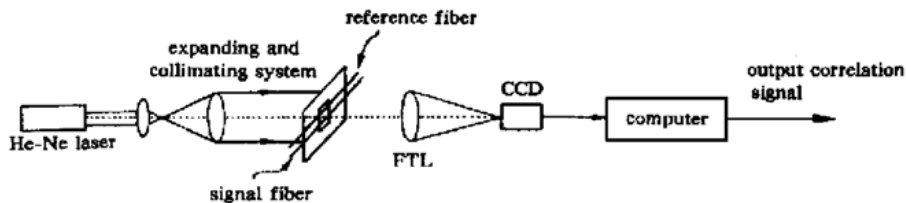


Fig. 5 Schematic diagram of the fiber defect detection system based on a hybrid joint transform correlator

5 实验结果

图 6(a)~ 图 6(f) 分别是一参考光纤和三段待检测的有缺陷的光纤在焦面和离焦两种情况下采集谱得到的联合变换相关输出的三维立体图。两种情况的实验条件相同。图 6(g) 和图 6(h) 分别是由图 6(a) 和图 6(d) 对应的谱旋转 90° 得到的。谱有些偏斜是由于在采集时光纤不是完全水平造成的。得到相关输出的主要过程如下: 第一,采集联合功率谱。由于光纤的特定结构以及具有较高的光强透射率,联合变换频谱在垂直方向有很大的扩展范围,而最后形成互相关点的主要成分是高级谱部分,又由于 CCD 一次所采集的数据点的限制,不可能一次把整个频谱采集下

来。因此,在采集时,避开了零级谱,只采集一侧包含一级谱或高级谱的部分。采集的图像大小为 512 × 512。第二,因采集的图像有效信息在竖直方向能遍布 512 个像素点,而水平方向只分布在中间一小部分。为充分利用有效信息,把没有信息的部分裁剪掉,最后得到 256 × 512 的图像。第三,由计算机完成傅里叶逆变换。为了减小噪声和直流项的影响,对每一幅图像先求它在所有像素点上的算术平均值,然后让图像的每一像素的灰度值减去算术平均值,最后再用快速傅里叶变换程序进行傅里叶逆变换,得到相关输出。第四,归一化处理,即令各图中零级峰的最大值都为 1。

实验前在显微镜观察下,图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)或图 6(d)、图 6(e)、图 6(f)对应的三段光纤的缺陷依次增多。图 6 各三维图标有各相关峰值的大小。由此可见,光纤中缺陷存在的程度不同,所得相关输出的相关峰明显不同。因此,根据峰值的大小通过设定阈值可实现光纤的检测分类。另外,从图中实验结果看出,离焦采集谱得到的相关输出的峰值、信噪比等性能反而优于在焦面上采集谱得到的相关输出。原因可能有两个:第一,比较图 6(g)和图 6(h)两谱图可以看出,在焦面上采到的谱,光强分布在相对小的范围内,以致大部分谱的强度高于 CCD 的饱和灵敏

度,从而谱的细节很少,影响了相关输出的峰值大小;第二,在焦面上因谱的条纹细密,CCD 的分辨率不足以分辨。然而,一定范围的离焦,一方面使谱得到扩展,落于 CCD 每个像元上的光强大大减弱,从而大部分的谱信息低于 CCD 的饱和灵敏度;另一方面,也使谱的条纹变粗,使得 CCD 能够分辨。虽然,在理论上离焦会使相关峰的峰值有一定程度的下降,但能够采集到更多的谱信息所引起的相关峰的增强足以对其加以补偿。另外,从理论分析及计算机模拟实验中已经知道,离焦量不大时,相关峰的衰减是很小的。

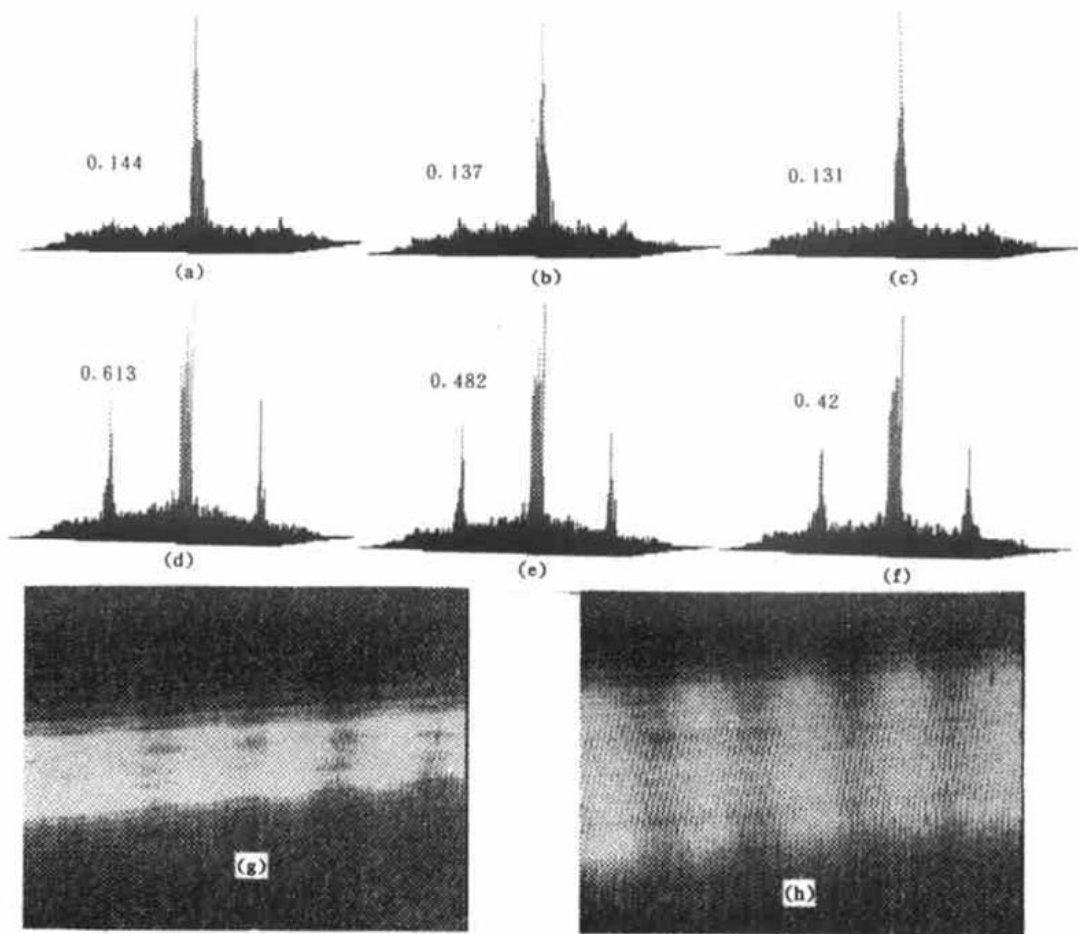


Fig. 6 The 3-D plots of correlation output of different signal fibers: (a) ,(b) and (c) is the output results using CCD to sample spectrum in the focus plane; (d) ,(e) and (f) is the output results using CCD to sample spectrum in off focuss plane; (g) and (h) is the joint power spectrum according to (a) and (d)

结论 从理论分析、计算机模拟以及光纤检测的实验三个方面对光电混合联合变换相关器中离焦采集谱的问题进行了讨论。通过理论分析,得知离焦采集谱进行联合变换相关的实质相当于将输入物函数乘上一个与坐标有关的相位因子后再进行联合变换相关。从计算机模拟计算得出的离焦距离与相关峰值的关系曲线中,可以看出,随着离焦距离的缩小,得到的相关峰值是逐渐向焦面谱得到的相关峰值逼近的,而

且,参考图像与目标图像间的距离越小,在一定峰值误差范围内满足要求的离焦范围越大。接着通过对相似程度不同的输入物 EE、EF 和 ET 的离焦谱和焦面谱两种情况下进行计算机模拟,可以看出,离焦得到的联合变换相关输出除峰值稍微低一些之外,其它的性能参数(如峰值位置,峰值的半宽度、识别能力等)几乎保持不变。最后通过在焦面上和离焦一定范围采集谱得到不同缺陷程度光纤的相关检测的实验

中发现, 离焦得到的相关输出在信噪比、峰值强度等性能方面反而优于焦面谱得到的相关输出。这是由于实际操作中离焦采集的谱的扩展范围更大, 使得各个位置谱的强度大大减弱, 从而条纹更清晰, 从而可以采集到更多的谱信息, 提高了光纤检测系统的识别能力。

参 考 文 献

- [1] Weaver C J, Goodman J W. A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1248~1249
- [2] Jabivi B, Odeh S F. Multiple object identification by bipolar joint transform correlation. *Opt. Eng.*, 1988, **27**(4): 295~300
- [3] Kim Y, Berra P B. Optoelectronic full-text retrieval system. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(5): 906~ 914
- [4] Fielding K H, Hornor J L, Makekau C K. Optical fingerprint identification by binary joint transform correlation. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(12): 1958~ 1961
- [5] Tam E C, Yu F T S, Tanone A *et al.*. Data association multiple target tracking using a phase- mostly liquid crystal television. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(9): 1114~ 1121
- [6] Liu W, Kim H, Lee S *et al.*. Joint transform correlator for the detection of defects in optical fibers. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(5): 1468~ 1474

Discussion about Off-Focus Influence on Joint Transform Correlator for Optical Fiber Detection

Liu Wei Yange Liu Yimo Zhang

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, EMC, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 6 September 1999; revised 12 November 1999)

Abstract: The spectrum sampling out of focus of joint transform correlator has been discussed from three points of view, that is, theoretical analysis, computer simulation and experiment of the detection of defects in optical fibers. The relation curves between cross-correlation intensity and off-focus distance is obtained. The computer simulation results of joint transform correlation with different reference images and signal images in focus plane and off-focus plane respectively are demonstrated. The experimental results of detection for defects in fiber with different optical fibers in focus plane and off-focus plane are given.

Key words: joint transform correlation; Fourier transform; off-focus spectrum; focus spectrum; optical fiber