

传像光纤束单丝芯径大小 对光纤像面全息图的影响*

于 助 宋 伟 贺光裕 满德发

(哈尔滨理工大学激光研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要 光纤像面全息可以获得较高衍射效率的全息图和再现较大的物像。文中分析了相干光激励下传像光纤束单丝芯径的大小对其输出光场的影响, 以及输出光场中低阶模与高阶模对全息照相的不同作用, 在此基础上, 提出缩小传像束单丝芯径、增多单丝根数, 可以提高光纤像面全息图衍射效率和分辨率的观点, 并通过实验进行了验证。

关键词 传像光纤束, 像面全息, 衍射效率, 分辨率。

1 引 言

对处于封闭系统内部、远距离或危险环境中的物体进行全息记录和检测时, 须使用传像光纤束将物体的信息光波传输至方便的地方进行操作。众所周知, 传像光纤束是由大量芯径较细的单根多模光纤作相关密集排列组成。在相干光激励下, 由于模间干涉, 其输出光场呈亮、暗光斑相间的空间分布, 谓之模斑场^[1], 这种偏振性消失的不均匀模斑场是造成光纤全息图衍射效率和分辨率下降的主要原因^[2]。

在分析了多模光纤传输的低阶模和高阶模对全息照相的贡献不等同的基础上, 认为用增大传像束芯子半径来增多模式数目, 以使模斑场更均匀的办法不可取, 相反, 缩小传像束单丝芯径、增多单位横截面中的单丝根数, 才能提高光纤像面全息图的衍射效率和分辨率。

光纤像面全息是用成像耦合透镜, 将被测物体的像清晰地成在传像束的输入端面上, 再用成像透镜将输出端面物体的像成在全息底片附近, 用参考光记录。可根据需要将像放大, 又由于透镜的会聚作用, 增加了全息底片上单位面积的模斑数, 提高了模斑场的均匀性, 比一般光纤全息具有更大的实用价值。

本文通过实验分析对比了不同单丝芯径传像束输出的模斑场的结构差异; 分别用不同芯径传像束记录全息光栅并测定它们的衍射效率; 记录分辨率板的像面全息图并测定它们的分辨率; 记录实物光纤像面全息图并进行对比; 最后证明了细单丝芯径传像束用于光纤像面全息, 将获得较高衍射效率和分辨率。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 6 月 23 日; 收到修改稿日期: 1996 年 12 月 16 日

2 传像光纤束输出的模斑场

在相干光激励下, 传像束输出端面的光场可表述为^[3]

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, z = L, t) = \sum_i \sum_m \mathbf{E}_{mi}(\mathbf{r}) c_{mi} \exp [j(\omega t - \beta_{mi}L)] F(t - t_{mi}) \quad (1)$$

其光强分布为

$$I(r, z = L, t) = \sum_i \sum_m |c_{mi} E_{mi}(r)|^2 + \sum_{i \neq k} \sum_{m \neq n} \sum \sum \mathbf{E}_{mi}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_{nk}(\mathbf{r}) c_{mi} c_{nk}^* \times \exp [j(\beta_{nk} - \beta_{mi})L] \hat{K}(t) F^*(t + |t_{nk} - t_{mi}|) \quad (2)$$

式中第一项为不相干的模式形成的均匀场, 第二项为相干形成的模斑场。出射后的远场分布为端面光场的衍射放大^[4], 与(2)式一致。这种光场显然是准均匀的, 并且随着模斑数的增多而愈均匀。模式之间的干涉虽然是一种随机过程, 但输出的模斑场是稳定的, 只是偏振性消失, 相干度有些下降。用模斑场记录的全息图较直接用激光所拍摄的全息图衍射效率和分辨率等都有所下降。

增多模斑数, 使光场趋于均匀, 是减小模斑场对全息照相影响的一条途径。由于模斑数与光纤中传导的模式数大致相等, 所以欲增多模斑数, 必须增多实际传输的模式数。

增多模式数有两条途径。第一, 增大多模光纤可传输的模式总数, 可通过增大芯子半径、相对折射率之差或者通过调整光源对光纤始端的激发耦合方式来获得^[5], 但对光纤全息照相来说, 这个方法不可行。因为这样增多的是高次模数目。由于高次模能量低, 相干性差, 稳定性和抗干扰能力也较差, 而且易损耗、噪声大, 因此用这种方法实现的准均匀光场, 信噪比没有提高^[6], 对全息照相不利。另外, 虽然单根多模光纤其可能传输的模式数与半径的平方成正比, 但实际传输的激发模数目并不如此, 尤其在弱波导和准直耦合的情况下, 只有少量的模式被激发, 而且大部分光功率被限制在几个低次模式中^[6, 7], 所以, 用增大传像束单丝芯径来增多模式数以改善模斑场均匀性的方法, 对全息照相来说并不是一个好方法。

增多模式数的第二条途径是增多低次模数目, 改善模斑场成份。这可以通过缩小传像束单丝芯径、增多单位横截面积内单丝根数来实现。仅就传像束一根单丝来说, 传输的模式数会相对减少, 但由于根数增多, 传像束传输的总模式数并没有明显减少, 而低次模数量却有显著增加。由于低次模能量高、损耗低、稳定性好、相干性较好和抗干扰能力强, 因此对全息照相来说, 低次模是至关重要的。

3 实 验

使用中国南京 841 所研制的三种不同单丝芯径的传像光纤束: (A) 14 μm , (B) 18 μm , (C) 28 μm ; 单丝为阶跃折射率多模光纤, 敷层折射率 $n_1 = 1.525$, 芯子折射率 $n_2 = 1.626$, 长为 1.25 m, 横截面积为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 。

3.1 观察传像光纤束输出光场的结构

用输出功率为 25 mW 的 He-Ne 激光, 平行准直后入射传像束始端(图 1), 在输出端后 2 m 处立一屏幕, 分别观察(A)、(C)两根传像束投于屏上的模斑场。

图 2 的(a)和(c)为传像光纤束(A)和(C)输出光波直接投于屏上的模斑场照片。可以看出, 在入射条件相同的情况下, 单丝芯径较细的(A)束在屏上的模斑场面积较大, 模斑的粒径也相应变大^[8], 模斑的数密度变小, 光场的均匀性变差, 这些都是衍射效应造成的结果。为了模仿像面全息的条件, 在传像束(A)输出端放置会聚透镜, 使(A)、(C)束在屏上的光场

面积接近等大。图 2(a') 是会聚后(A)束在屏上的模斑场照片, 此时(a')与(c)相比, 平均光强和模斑密度都已增大, 而且模斑粒度变小, 光场更均匀柔和, 反差小。从(a)、(c)和(a')三个模斑场中心区域的放大照片(a₀)、(c₀)、(a'₀)中能更清楚地看出这一点。(A)束的(a'₀)模斑场中低次模(斑)密度明显较(C)束的大。

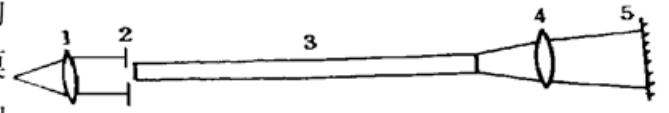


Fig. 1 Light path diagram for observing speckle field of image-carrying optical fiber bundle (A) or (C)
1. collimating lens, 2. diaphragm, 3. (A) or (C), 4. converging lens, 5. observation screen

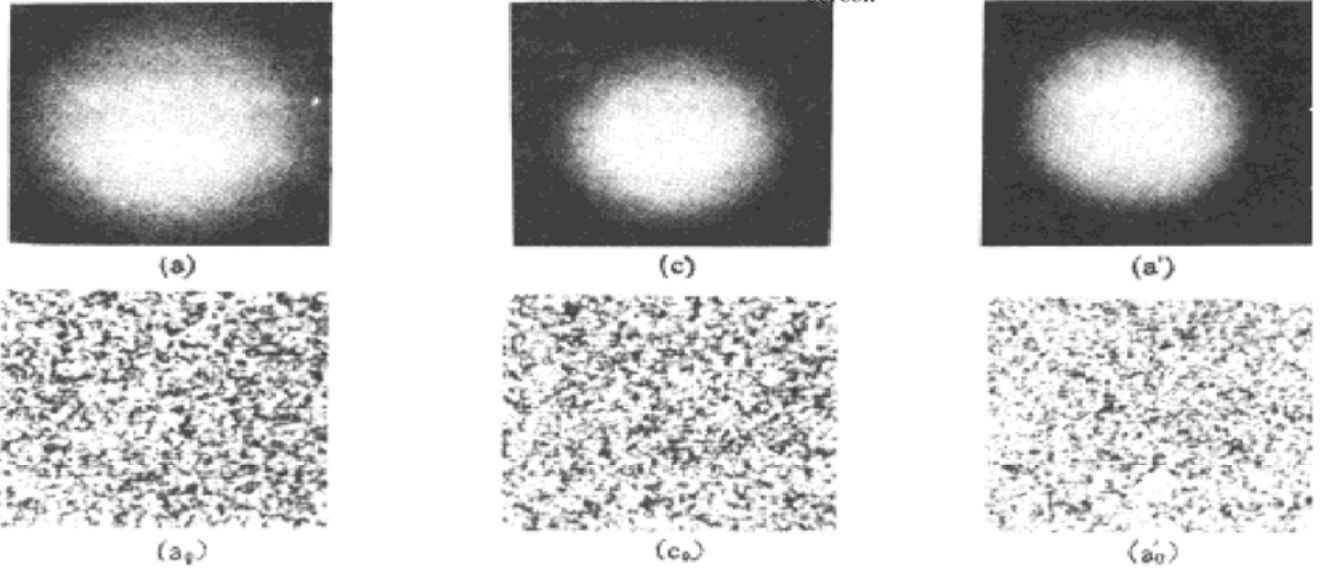


Fig. 2 Photographs of the speckle fields of image-carrying bundles (A) and (C)

(a) and (c) correspond to (A) and (C) directly projected on the screen; (a') corresponds to (A) through converging lens; (a₀), (c₀) and (a'₀) are amplified ones of the central area of (a)、(c) and (a') respectively

由以上观察可得出结论: 在像面全息术中, 使用单丝芯径细的传像光纤束传输物光, 其光场的均匀性、稳定性、相干性和信噪比都较好。

3.2 测量不同芯径传像束拍摄的全息光栅的衍射效率

图 3 所示为记录全息光栅的光路示意图。He-Ne 激光器输出功率为 50 mW, 激光经平行准直后入射传像光纤束始端, 为模仿像面全息条件, 在传像束输出端后置一透镜, 将输出光变成准平行光, 并与一束平行光在全息底片上相干。分别拍摄(A)、(B)、(C) 三根传像束输出的模斑场的全息光栅, 每次记录时, 三根传像束须严格复位, 平行光角度始终不变, 调整光强使之均匀分布, 并与模斑场的中心处光强比尽量

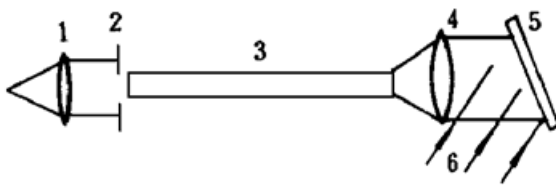


Fig. 3 Schematic diagram for recording hologram gratings

1. collimating lens, 2. diaphragm, 3. one of (A), (B) or (C), 4. imaging lens, 5. hologram photoplate, 6. parallel beam

接近 1·1。当用平行光照明全息光栅时, 除零级透射光外, 只有±1 级衍射光。由于只关心三块光栅的相对衍射效率, 所以定义光栅的衍射效率为

$$\eta = (I_{+1} + I_{-1}) / I_0 \tag{3}$$

式中 $I_{\pm 1}$ 为 ±1 级衍射光强, I_0 为零级透射光强。用一覆盖整个干涉场的平行光照明全息光

栅,可测量平均衍射效率;用一细束平行光逐一照射光栅不同部位,可测量不同区域的衍射效率。图 4 为测量示意图。

测得三块光栅各自的平均衍射效率为

$$\eta(A) = 55\%, \quad \eta(B) = 53\%, \quad \eta(C) = 49\% . \quad (4)$$

可见,用单丝芯径较细的传像光纤束输出的模斑场拍摄的全息光栅,其衍射效率相对较高。这与在像面全息条件下,传像束单丝芯径越细,其投射到全息底板上的模斑密度和低次模密度越大,光场愈均匀的观察结果一致。从而也证明了用单丝芯径较细的传像光纤束传输物光波拍摄像面全息图时,将获得较高的衍射效率。测量全息光栅不同区域的衍射效率的结果,用图 5 的坐标曲线表示。横坐标 0 点对应光栅中心,向两边每隔 0.5 cm 测一次。从曲线上可以看出,对应模斑场中心部位,光栅衍射效率最高,越靠近边缘处衍射效率越低,这与同一传像束输出的模斑场中心部位的模斑密度和低次模密度较边缘处大的观察结果是一致的。

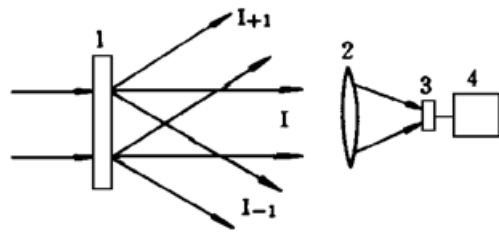


Fig. 4 Measurement of hologram optical fiber diffraction efficiency

- 1. Hologram grating, 2. converging lens, 3. Photo-cell, 4. Power meter

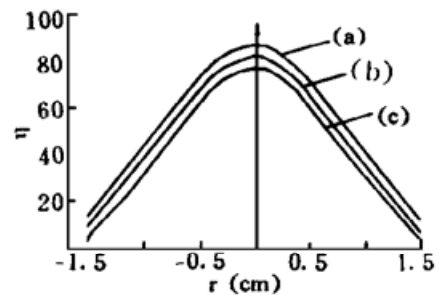


Fig. 5 Curves of the diffraction efficiencies of the hologram gratings at different points

3.3 测定光纤像面全息图的分辨率

拍摄分辨率卡的光纤像面全息图。光路与图 3 相同,只是将 WT-1005-62 型分辨率板的 N₃ 号与传像束始端紧密接触,输出端后用成像透镜将 N₃ 号线条的像放大成在全息底片上,用平行光记录。再现时,用放大透镜将分辨率板的全息像进一步放大,直至人眼能方便地判读全息像上的线条为止。将图 3 中传像束端后的成像透镜去掉,拍摄分辨率板的一般光纤全息图并测量它们的分辨率。与直接测量的传像光纤束的分辨率对比,结果列入表 1 中。

Table 1. Comparison of resolution

single core diameter (μm)	image-carrying bundle			image plane hologram			usual hologram		
	unit	line width (μm)	resolution (line pair/mm)	unit	line width (μm)	resolution (line pair/mm)	unit	line width (μm)	resolution (line pair/mm)
(A) 14	N3 19	14.1	35.4	N3 17	15.9	31.5	N3 8	26.7	18.7
(B) 18	N3 15	17.8	28.1	N3 13	20.0	25.0	N3 7	28.3	17.7
(C) 28	N3 7	28.3	17.7	N3 6	30.0	16.7	N3 5	31.7	15.7

可以看出,一般光纤全息图的分辨率是较低的,此时当传像束芯径变细时,由于输出光场质量变差,全息图分辨率显著下降。只有在像面全息的条件下缩小单丝芯径才会大幅度提高分辨率,说明模斑场质量是影响全息图分辨率的主要因素。

3.4 光纤像面全息图

传像束输出的物光模斑场由(1)式简化为(略去时间因子):

$$\begin{aligned}
 O(x, y) &= \sum_m \sum_i [O_{mi}(x, y) \exp(-j\beta_{mi}L)] \exp[j\mathcal{Q}(x, y)] \\
 &= O_0(x, y) \exp[j\mathcal{Q}(x, y)]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

与参考光 $R(x, y) = R_0(x, y) \exp[j\mathcal{Q}_k(x, y)]$ 在干版上干涉, 形成像面全息图。用 $C(x, y) = C_0(x, y) \exp[j\mathcal{Q}(x, y)]$ 再现光波照明此全息图, 再现物体原始像的光场分布为

$$W_2 = C_0 R_0 \exp[j(\mathcal{Q}_c - \mathcal{Q}_k)] \sum_m \sum_i [O_{mi}(x, y) \exp(-j\beta_{mi}L)] \exp(j\mathcal{Q}) \tag{6}$$

再现像的光强分布为

$$\begin{aligned}
 |W_2|^2 &= C_0^2 R_0^2 \sum_{m=n} \sum_{i=k} |O_{mi}|^2 + C_0^2 R_0^2 \sum_{m \neq n} \sum_{i \neq k} \sum O_{mi} O_{nk}^* \\
 &\quad \times \exp[j(\beta_{nk} - \beta_{mi})L]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

其中第一项为再现均匀物光波, 第二项为再现模斑场物光波。可见, 光纤像面全息图的再现像是在原物体表面出现了大量模斑。

图 6 为拍摄实物光纤像面全息图的光路图。

He-Ne 激光器功率为 50 mW, 分别用(A)、(B)、(C)三种传像束传输物体的像, 用成像透镜将传像束输出端面上的像放大后成在干版上, 用平面参考光记录。照明物光和参考光不用光纤传输。

图 7 的(a)、(b)、(c)是分别用(A)、(B)、(C)三种传像束记录的像面全息图再现像照片。对应单丝芯径最细的(A)传像束的再现像(a)边缘清晰, 像质明亮, (b)次之, 边缘处可见到一些模斑, 而对应(C)传像束的再现像(c)上有明显的模斑存在, 边缘模糊。

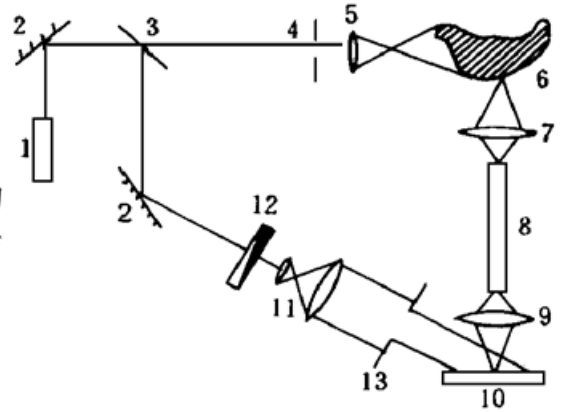


Fig. 6 Light path diagram of optical fiber image plane hologram
1. He-Ne laser, 2. reflector, 3. beam splitter, 4. spatial filter, 5. expanding lens, 6. object, 7. coupling lens, 8. one of bundle (A), (B) or (C), 9. imaging lens, 10. photoplate, 11. collimating lens, 12. continuous attenuator, 13. diaphragm

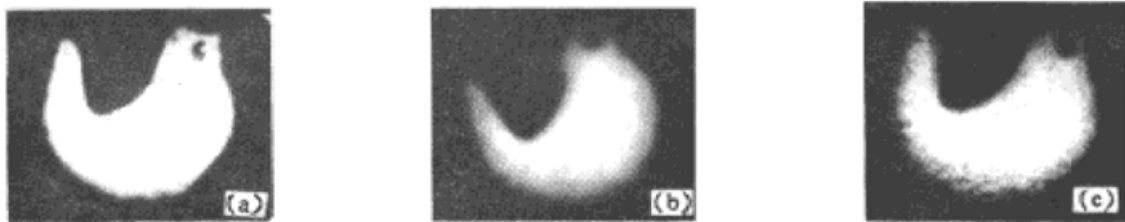


Fig. 7 Reconstructed image photographs of optical fiber image plane holograms
(a)、(b) and (c) correspond to (A)、(B) and (C) respectively

结 语 在须使用传像光纤束将被测物体的信息光波传输至方便的地方进行全息照相时, 以采用像面全息术为好, 它可以将放大的像成在全息干版上, 便于观察和测量, 比在传像束输出端后不用成像透镜的全息照相衍射效率和分辨率有大幅度提高。多模光纤输出模斑场的消偏性和不均匀性是造成光纤全息图衍射效率和分辨率下降的主要原因, 目前, 尚未找到消除模斑的好办法, 只能设法减小它的影响。实验证明, 在光纤像面全息术中, 使用单丝芯径较小的传像束所拍摄的像面全息图具有较高的衍射效率和分辨率。

参 考 文 献

- [1] 叶培大, 光纤理论. 上海, 知识出版社, 1985: 96, 123
- [2] F. Albe, Use of an endoscope for optical fiber Holography. *Proc. SPIE*, 1985, **600**: 199~ 203
- [3] 孙远坤, 杜吉, 张以谟等, 多模光纤束产生的散斑场全息照相. *光学学报*, 1988, **8**(2): 145~ 151
- [4] 王奇, 杨天龙, 沈文达, 弱波导光纤出射模在衍射远区的场分布. *光学学报*, 1987, **7**(1): 62~ 67
- [5] 于助, 刘国华, 光纤全息术的研究. *哈尔滨科技大学学报*, 1988, **10**(4): 75~ 79
- [6] W. Thomas, The energy distribution of the real mode in multimode optical fiber and its effect on mode noise. *Opt. Lett.*, 1984, **3**(9): 102~ 106
- [7] D. N. Payne, Mode excitation in a multimode optical-fibre waveguide. *Electron Lett.*, 1989, (25): 13~ 15
- [8] 华家宁, 多模光纤束斑纹场及其应用. *中国激光*, 1994, **21**(6): 469~ 472

Effect of Single Fiber Core Diameter of Image-Carrying Optical Fiber Bundle on Optical Fiber Image Plane Hologram

Yu Zhu Song Wei He Guangyu Man Defa

(*Laser Institute, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080*)

(Received 23 June 1996; revised 16 December 1996)

Abstract With optical fiber image plane hologram, the hologram of higher diffraction efficiency can be obtained and larger object image can be reconstructed. The influence of the single fiber core diameter size of image-carrying optical fiber bundle on the outlet optical field under the excitation of coherent light is analyzed. The different effects of low-order modes and high-order modes in the outlet optical field on hologram are discussed. On the basis of above, it is suggested and verified experimently that the diffraction efficiency and resolution of optical fiber image plane hologram can be improved by decreasing the single fiber core diameter and increasing the number of the single fiber of image-carrying bundle.

Key words image-carrying optical fiber bundle, image plane hologram, diffraction efficiency, resolution.