

# 应用波分复用改善像束传像系统像质的研究

迟泽英 陈文建 游明俊

张逸新

(华东工学院光电技术系, 南京 210014)

(无锡轻工业学院物理系, 无锡 214036)

## 提 要

本文通过分析空间波分复用系统中色散元件的色散平均效应, 用线扩散传递函数研究了像束传像性质, 由光学成像的本征理论用像束成像信息量分析了波分复用改善像束传像像质的机制, 并从实验上验证了上述分析结论.

**关键词** 纤维光学, 图像传输, 信息理论.

## 1 引 言

为了改善光纤像束系统传输图像的像质, 可通过增加像元数, 降低暗纹面积来达到, 直接的方法是减小像束的单丝直径, 然而这种方法将增加像束制作的难度, 为了既不增加像束制作的难度又能提高成像像质, 人们提出了动态扫描<sup>[1]</sup>和空间波分复用技术<sup>[2]</sup>等方法. 其中, 波分复用技术是一种较理想的方法<sup>[3]</sup>. 为此, 国外对这种方法提高分辨率的程度和减低像的不均匀对比度等作了一些理论分析<sup>[2,3]</sup>. 但是, 这些分析都不够全面, 因为图像的瑞利分辨率判据仅是一种随仪器变化的分辨率极限判据, 并不是一个能客观评价光学系统成像质量的参量. 信息论的近代研究表明, 光学系统的信息量是综合评价系统成像质量的理论极限的较客观的参量, 因此, 应该用传像系统传输图像的信息量来评价波分复用像束传像系统的像质改善量.

本文将用图像信息量来综合评价波分复用光纤像束传像系统的成像像质.

## 2 波分复用像束系统成像过程分析

波分复用光纤像束传像系统如图 1 所示. 物体是由非相干复色光照明下的透明相片构成, 在该系统中物面光场经 Direct-Vision 棱镜色散后, 由透镜成像于像束输入端面, 由于透镜  $L_1$  的会聚作用, 射入像束的光波能在全反射条件下通过波导中各根光纤, 由于棱镜的色散作用, 物面上同一点的不同波长的物光场能进入沿色散方向上不同位置的光纤, 而不同物点波长不同的光波进入同一光纤, 即同一光纤可以传输物面上不同位置的像元, 从而实现了单根光纤传输多个图像像元, 再由像面前色散棱镜复原, 达到改善系统成像像质的目的.

由于光纤像束在传像过程中经历了图像抽样和重构过程, 因而光纤像束的点像分布函数

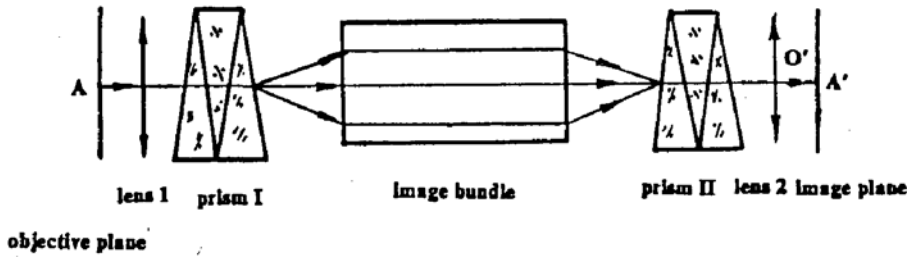


Fig. 1 Schematic diagram of the wavelength multiplexing system

不再是位移不变的,即传像束是图像传输线性变系统.对于点像分布函数位移可变系统,不存在位移不变系统中采用的那些处理关系.为此,下面分析波分复用光纤像束系统的传像规律.

通常光纤传像束是由大量玻璃光纤按一定规则排列而成,其通光窗往往是方形或矩形的,所以在下面讨论中就以具有正方形截面的像束为分析对象.由直视棱镜色散特性,入射图像经色散元件色散后,物面复色点物光源发出的光场,在传像束输入端面是以线光源发射光场形式射入传像束的.比较长狭缝的类似传输效果可见,物方色散元件产生的效果相当于在像束入射端面上加了一狭长透光狭缝;而像方色散棱镜又相当于长狭缝光阑,应用激光理论中近似恢复思想<sup>[4]</sup>,把色散棱镜近似地看为长狭缝,所以,在色散元件的作用下,沿色散方向上像面图像分布不再是点阵式分布而是连续分布的,从而使得光在光学系统中传输的点像分布函数转化为线像分布函数.

假定色散沿 X 方向,则在一定区域的像束输入端面的光强分布为  $O(x)$ ,  $x$  是位置坐标,而输出光强  $I(x)$ ,也是  $x$  的函数.如图 2 所示,把色散的作用等效于一垂直色散方向的狭缝,现考虑沿  $x$  方向  $x_n$  处光纤的成像过程,设该缝的缝函数为  $w(x - x_n)$ ,那么从位于  $x_n$  处光纤输出的像元像为:

$$I_n(x) = O_n w(x - x_n) \quad (1)$$

这里  $O_n$  是由像束端面进入  $x_n$  处光纤的图像元强度,其满足

$$O_n = \int_{-\infty}^{\infty} O(x) w(x - x_n) dx \quad (2)$$

从而像束输出图像的光强分布为

$$I(x) = \sum_n w(x - x_n) \int_{-\infty}^{\infty} O(x') w(x' - x_n) dx' \quad (3)$$

下面用抽样理论分析该系统的图像传输规律,在(3)式中引入  $\delta$  函数,从而有:

$$I(x) = \sum_n \left\{ \left[ \int_{-\infty}^{\infty} w(x - x'') \delta(x'' - x_n) dx'' \right] \int_{-\infty}^{\infty} O(x') w(x' - x_n) dx' \right\} \quad (4)$$

(4)式中交换积分与求和次序

$$I(x) = w(x) * \left\{ \sum_n \delta(x - x_n) [w(x) \otimes O(x)] \right\} \quad (5)$$

式中  $*$  是卷积运算符号,  $\otimes$  是互相关运算符号.对于像束中任一光纤,其位置坐标为  $x_n = ma + x_0$ ,  $m$  是整数,  $a$  是光纤单丝直径,把  $x_n$  代入(5)式并作傅里叶变换,则有

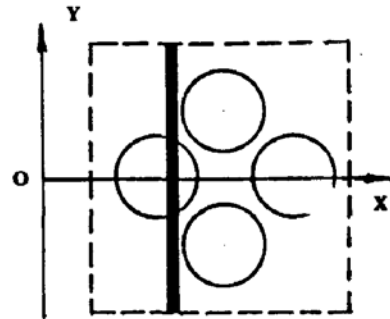


Fig. 2 Geometrical diagram of dispersion slit

$$I(\omega) = \frac{1}{a} W(\omega) \left\{ \sum_m \sum_i \delta(\omega - m\Omega) [\exp(im\Omega x_i)] * [W^*(\omega) O(\omega)] \right\} \quad (6)$$

这里  $\Omega = 2\pi/a$  是抽样频率. 若光纤按正方点阵排列, 即  $x_n = ma$ , 那么(6)式简化为:

$$I(\omega) = \frac{1}{a} W(\omega) \left\{ \sum_m W^*(\omega - m\Omega) O(\omega - m\Omega) \right\} \quad (7)$$

上式的物理解释是, 输入空间谱  $O(\omega)$  被入射缝函数  $w(x)$  的傅里叶变换共轭  $W^*(\omega)$  滤波, 其结果可看作为以抽样频率  $\Omega$  间隔对光纤空间抽样复制的结果, 该结果空间谱再由出射  $W(\omega)$  滤波得到输出像面空间频谱, 对于一般排列光纤像束, 虽然(6)式较复杂, 但是与(7)式所反映的物理过程还是相同的. 由于色散构成的等效狭缝是一个宽度很小的缝, 再者光纤单丝丝径也是很小的, 所以“狭缝”相当于一个低通滤波器  $W(\omega)$ . 因而, 在  $W(\omega)$  作用下, 像面获得的像空间频谱的零级成分是光场的主部, 所以, 若忽略像谱的高频成分, 则从(6)式得到像面像频谱为:

$$I(\omega) \approx I_0(\omega) = \frac{1}{a} |W(\omega)|^2 O(\omega) \quad (8)$$

在空间域, 像函数满足

$$I_0(x) = R_w(x) O(x) \quad (9)$$

若狭缝宽度为  $X_0$ , 并由平均波长为  $\bar{\lambda}$  复色光照明<sup>[5]</sup>, 且狭缝由经焦距为  $f$  的透镜准直后的物光照明, 接收透镜的焦距也是  $f$ , 则(9)式也可表示为

$$I(x) = \int_{-X_0/2}^{X_0/2} R_w(x - x') O(x') dx' \quad (10)$$

(9)式表明, 输出光强的频域零级分量是输入光强与空间线扩展函数的卷积, 即在色散元件作用下, 沿平行于色散方向上图像的传输, 像分布函数是线性不变的, 也就是说, 通过采用波分复用技术后, 本来是线性变系统转化为线性不变系统, 因而, 在该方向上可应用图像传输本征理论研究图像信息传输.

### 3 波分复用像束系统的信息量

上面分析表明, 虽然由于像束的抽样特征, 其点像分布函数不再具有位移不变性, 但是, 由于波分复用像束传像系统中色散元件的作用, 在色散的方向上又恢复了线像分布函数的位移不变性, 利用色散的这种功效, 如果色散元件的色散方向按文献[3]所提出的二维色散的最佳方向安排, 则可以把波分复用像束系统看作线性不变系统来处理, 现在色散棱镜和像束等价于一个矩形孔径, 而图1所示的像束系统等价于图3所示的光学系统.

假定图3中透镜  $L_1$  和  $L_2$  满足 Lagrangian-Helmholtz 不变量条件且放大倍率为1, 同时不考虑色散棱镜等其它元件对图像传输信息量的影响, 由文献[6]对有噪声非相干光照明时图像信息量的分析, 在假定物波由白光照明下的矩形图像构成的条件下, 波分复用像束传像系统的图像传输过程可用下列本征方程描述:

$$\gamma_{nm} u_{nm}(x, y) = \iint_{\Sigma} u_{nm}(x', y') K(x' - x, y' - y) dx' dy' \quad (11)$$

其中  $K(x' - x, y' - y) = \frac{\sin^2 \Omega_1(x' - x)}{\pi \Omega_1(x' - x)^2} \cdot \frac{\sin^2 \Omega_2(y' - y)}{\pi \Omega_2(y' - y)^2}$ ,  $u_{nm}(x', y') = u_n(x') u_m(y')$

$\Omega_1 = \pi X_0 / 4\bar{\lambda}f$ ,  $\Omega_2 = \pi Y_0 / 4\bar{\lambda}f$ ,

式中  $\Sigma$  为物面线度,  $u_n, u_m$  为线性椭球波函数,  $X_0$  为矩形孔径宽度, 而  $Y_0$  为其高度,  $\gamma_{nm} = \gamma_n \gamma_m$ ,  $\gamma_n, \gamma_m$  分别为线性椭球波函数  $u_n, u_m$  的本征值, 且满足  $|\gamma_n| \geq |\gamma_{n+1}|$ ,  $\gamma_m \geq |\gamma_{m+1}|$ ,  $i \geq 0$ ,

现在  $|\gamma_{[N]}\gamma_{[M]}| = \bar{\sigma}_v/\bar{\sigma}_0^{[6]}$ , 这里  $\bar{\sigma}_v$  和  $|\bar{\sigma}_0|$  分别为在  $\Sigma$  区域取平均的噪声和信号方差. 若系统信噪比是均匀各向同性的且有  $\bar{\sigma}_v/\bar{\sigma}_0 = (\sigma_v/\sigma_0)^2$ ,  $x$  和  $y$  方向的系统像的自由度由分析<sup>[6]</sup>可分别表为  $N = (AC_1/\pi)[1 - (\sigma_v/\sigma_0)]$ ,  $M = (AC_2/\pi)[1 - (\sigma_v/\sigma_0)]$ , 其中  $C_1 = (x_0/2)\Omega_1$ ,  $C_2 = (y_0/2)\Omega_2$ ,  $x_0$  为物宽,  $y_0$  为物高,  $\sigma_v^2$  为系统噪声方差,  $\sigma_0^2$  为物光强度方差, 则系统等效自由度为:

$$N_{eff} = (16C_1C_2/\pi^2)[1 - (\sigma_v/\sigma_0)]^2 \quad (12)$$

对于对称系统即  $N = M$ ,  $|\gamma_{[N]}\gamma_{[M]}| = |\gamma_{[N]}|^2$ , 从而有

$$[1 - (\pi/4C)N]^2 = \frac{\bar{\sigma}_v}{\bar{\sigma}_0} \quad (13)$$

系统等效自由度  $N_{eff}$  为

$$N_{eff} = (4C/\pi)^2 [1 - \sqrt{\bar{\sigma}_v/\bar{\sigma}_0}]^2 \quad (14)$$

### 4 实验结果与讨论

从光学信息论知道, 若图像的信息自由度高, 那么图像所包含的独立可分辨元素也高, 也就是说图像分辨率高, 由本文所获得的结果(14)式, 可以清楚地认识到波分复用技术改善图像分辨率的原因, 在一定的系统噪声条件下,  $N_{eff}$  的大小由参量  $C$  决定, 而  $C = x_0\Omega/2$ , 对于物面为边长是  $x_0$  的正方形, 系统限制光瞳是边长为  $D$  的正方形(实际上  $D^2$  即像束通光窗面积), 则利用波分复用技术后, 图像所实际透过的光瞳是边长为  $(D + l_0/\sqrt{2})$  的正方形,  $l_0$  为棱镜线色散长度, 则参量  $C$  为

$$C = \frac{x_0}{2} \left[ \frac{\pi(D + l_0/\sqrt{2})}{4\lambda f} \right] \quad (15)$$

(15)式表明, 图像信息自由度与线色散长度有关, 色散量  $l_0$  越大, 系统等效自由度  $N_{eff}$  也越大, 即由波分复用像束系统所成像的分辨率越高<sup>[7]</sup>. 其物理意义是采用波分复用技术后, 原来成在光纤传像束光纤包层上不能被传输的物点现在通过其它光纤传输到另一输出端, 从而像的信息量比未采用波分复用技术时增加了, 并且随色散量的增大而增加, 由此, 从光学系统信息量的角度说明了空间波分复用技术提高像质的原因. 但是, 实际工作中并不是  $l_0$  越长, 分辨率即能无限制地提高的, 这可从下面二个因素说明:

(1) 因为像面物光点的光能有限, 由于色散当光点从点元扩展为线像元, 自然要降低单位长度上的物光强度, 由于光学元件的吸收, 以及光纤间填充物的阻挡, 因而当达到某一  $l_0$  值后, 继续增大线色散长度时, 通过像束传输的物信息量将达到极限值. 因此, 从光信息的利用效率考虑, 当色散方向上  $l_0$  等于相邻两光纤中心间距时, 由于被网格阻挡的物信息  $E$  几乎全被传

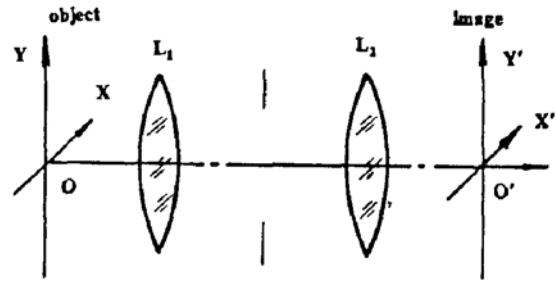


Fig. 3 Equivalent optical system

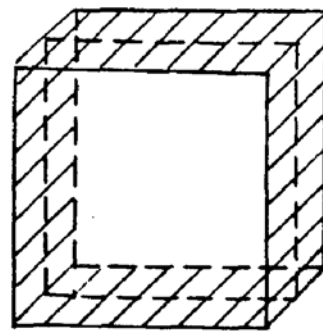


Fig. 4 Area of color information loss

由于被网格阻挡的物信息  $E$  几乎全被传

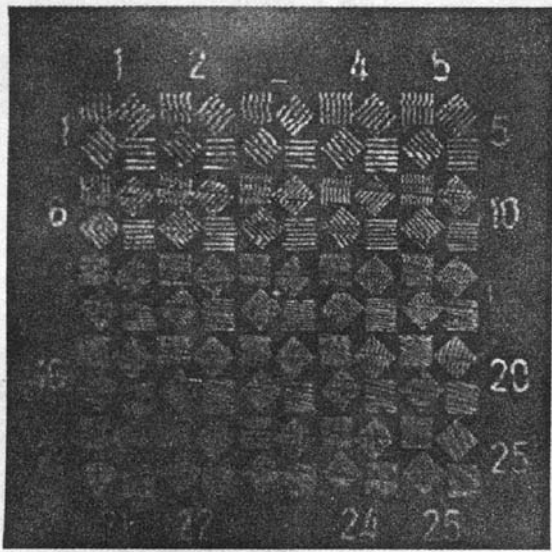
到像方,所以,这时的  $l_0$  可被认为是“最佳”值. 这样,系统自由度为

$$N' = \left(\frac{4C'}{\pi}\right)^2 [1 - \sqrt{\sigma_v/\sigma_0}]^2,$$

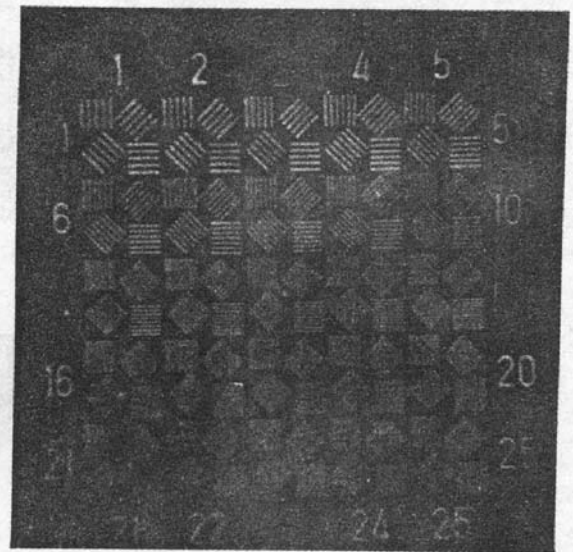
$$C' = \frac{\pi x_0 (D_0 + \sqrt{2} \times 3.57d_s)}{8\lambda f} \quad (16)$$

式中  $d_s$  是规则六角形排列光纤间距,白光  $\lambda = 550 \text{ nm}$ .

(2) 从色畸变角度看,假定物面面积  $x_0^2$  等于限制光瞳物理面积  $D^2$ ,那么由于经色散元件色散后,实际照到限制光瞳  $D^2$  上的照明物光是  $(x_0 + l_0/\sqrt{2})^2$ ,则在  $(x_0 + l_0/\sqrt{2})^2 - D^2$  面积上的光信息因未入射到像束而被损失,这些损失的光能将导致图像在某一区域的色畸变. 所以,为了减少图像色畸变区域,线色散也不能无限增大(见图 4).



Photograph 1



Photograph 2

对于上述分析,通过实验进行了验证,实验采用如图 1 所示的光路. 实验原理是,观察波分复用光纤传像束传像系统所传输的鉴别率板图案的成像质量,如是否存在断丝影响和网纹,条纹能分辨到几组,清晰程度等等. 由于实验条件限制,在实验中只对如下两种情况①不加波分复用系统,即线色散量为零;②加波分复用系统且改善效果达最佳状态的情况做了对比观察,并拍摄了光纤传像系统传输的鉴别率图案像(如照片 1 和照片 2 所示). 照片 1 线色散量为 0,照片 2 线色散量大小使得改善效果达最佳状态(对于定量实验还有待进一步研究). 实验所用的像束单丝直径为  $17\mu\text{m}$ ,六角形排列. 当未采用波分复用技术时,鉴别率板像可分辨到 7~8 组线对,像面上存在断丝和网纹效应(照片 1);而采用后,消除了断丝和网纹效应(照片 2)且图像清晰,可分辨到 18 组以上,由此可以看出,波分复用系统的成像质量比一般系统的成像质量好,光纤传像系统的传输图像的信息自由度高,因而波分复用光纤传像束传像系统的传像质量得到改善.

## 参 考 文 献

- [1] N. S. Kapany, J. A. Eyer, R. E. Keim, Fiber Optics Part II. Image transfer on statics and dynamic scanning with fiber bundles, *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, **47**(5):423~427
- [2] Charles J. Koester, Wavelength multiplexing in fiber optics, *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**(1):63~70
- [3] Yoshitoshi Itoh, Two dimensional resolution improvement of an imageguide by maximization of wavelength multiplexing, *Japan. J. Appl. Phys. Part 1*, 1987, **26**(8):1267~1270
- [4] M. 萨晋 III, M. O. 斯考莱, W. E. 兰姆著, 杨顺华, 彭放译, 激光物理学, 第一版, 北京, 科学出版社, 1982, 123~124
- [5] 张福根, 张以谟, 一种猫眼列阵腰相位共轭镜的研究, *光学学报*, 1989, **9**(8):699~704
- [6] M. Bendinelli, A. Consortini, L. Ronchi *et al.*, Degrees of freedom, and eigenfunction, for the noisy image, *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **6**(11):1498~1502
- [7] G. Toraldo di Franeia, Resolving power and information, *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(7):497~501

## Study of image quality improvement of optical fiber image bundle system with wavelength multiplexing

CHI Zeyin    CHEN Wenjian    YOU Mingjun

(Department of Photoelectrics, East China Institute of Technology, Nanjing, 210014)

ZHANG Yixin

(Department of Physics, Wuxi Light Industry Institute, Wuxi, 214036)

(received 3 October 1991; revised 18 September 1992)

### Abstract

This paper analyses the average dispersion effect of the dispersion elements of the spacial wavelength multiplexing image transmission system. Image quality of fiber image bundle system is studied with line spread transmission function. Based on the optical imaging eigen theory, the mechanism of image quality improvement of the image bundle system with wavelength multiplexing is analysed utilizing image bundle imaging information, and the above analysed conclusion is examined by experiment.

**Key words** fiber optics, image transmission, information theory.