

文章编号 1004-924X(2005)02-0185-06

# 线列光纤传像束的调制传递函数评价方法及检测

王 慧<sup>1,2,3</sup>, 向 阳<sup>1</sup>, 禹秉熙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**根据调制传递函数对比度定义, 推导了分析线列光纤传像束调制传递函数(MTF)的数理关系, 采用数值计算的方式, 分析了线列光纤传像束像元与输入信号之间的位相关系对调制传递函数的影响, 并进行了实验研究。结果表明, 输入信号与线列光纤传像束的位相匹配对调制传递函数有一定的影响。基于对数值分析结果的考虑, 提出线列光纤传像束的调制传递函数及评价方法, 理论分析与实验结果相吻合。

**关 键 词:** 光纤传像束; 调制传递函数; 位相匹配; 检测

**中图分类号:** TH703      **文献标识码:** A

## Comprehensive estimating and measuring method of line-array fiber-optic image bundles based on the modulation transfer function

WANG Hui<sup>1,2,3</sup>, XIANG Yang<sup>1</sup>, YU Bing-xi<sup>1</sup>

(1. *State Key Lab for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** With the definition of the contrast transfer function (CTF), the modulation transfer function (MTF) mathematics-theory relationship of line-array fiber-optics image bundles was established, the influence of phase match between input signal and line-array fiber-optic image bundles on the modulation transfer function was carried out by digital analysis, and the study of experiment was working. The results show that alignment between pixels of image bundle and input pattern has direct influence on measured result of the MTF. A measuring and evaluating method about the MTF of line-array fiber-optic image bundles is studied according to the simulation results. And the analysis is in correspondence with the results of experiment.

**Key words:** fiber-optic image bundles; modulation transfer function; phase match; measurement

收稿日期: 2005-01-14; 修订日期: 2005-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60378015); 中国科学院知识创新工程资助(No. C02L07Z)

## 1 引言

光纤传像束与传统光学成像系统相比,具有柔性传像、使用空间自由度大、易实现细长结构传像、质量轻等特点,光纤传像束已经广泛地应用在医学、工业、科研、军事等众多领域。因此,光纤传像束的像质评价问题也就变得更重要了。调制传递函数(MTF)是评价成像系统性能的重要指标之一<sup>[1]</sup>。光纤传像束与传统成像器件不同的是,光纤传像束是一种离散采样传(成)像器件,它对输入信号的采样是一种线性但不是完全空间不变的过程<sup>[2-4]</sup>。但对于序排列光纤传像束而言,在 Nyquist 频率范围内,调制传递函数的测量方法是适用的<sup>[5]</sup>。

对于光纤传像束调制传递函数的探讨,Alexander Arefiev 提出测量可变狭缝像的中心亮点,根据线扩散函数的傅里叶变换推导 MTF 对频率关系公式<sup>[6]</sup>。Kenneth J. Barnard 等根据像的谱是物的谱的傅里叶变换推导出对于矩形和六角形排列的六角形采样传像束的 MTF,做出平均传递函数曲线<sup>[7]</sup>。M. A. PLAYER 提出用“狭缝<sup>[8]</sup>”作为物根据调制传递函数是线扩散函数的傅里叶变换推导 MTF。Ramiro 提出“伦奇刻线图对比测 MTF<sup>[9]</sup>”,从伦奇刻线图中得出传函关系,并做 MTF 曲线。Rave<sup>[10-11]</sup>利用边缘扩散函数计算调制传递函数,从而做出 MTF 曲线。本文则从理论上讨论了评估光纤传像束的原理,并且根据 MTF 的对比度定义,讨论了线排列光纤传像束调制传递函数与输入信号位相的关系。

## 2 理论

根据 MTF 的对比度定义,设投射在线列光纤传像束上的信号分布为

$$I(x) = 1 + C_o(f) \cos(2\pi fx + \varphi), \quad (1)$$

其中  $I(x)$  为正弦物的光强度,  $C_o(f)$  为物的调制度,  $f$  为空间频率,  $\varphi$  为输入信号的位相,  $x$  为一维空间。经光纤传像束传播,在光纤传像束输出端上的光强分布为

$$I'(x) = 1 + C_i(f) \cos(2\pi fx + \varphi'), \quad (2)$$

其中  $I'(x)$  为像的光强度,  $C_i(f)$  为像的调制度,  $\varphi'$  为输出信号的位相。则光纤传像束的调制传递函数为

$$\text{MTF}(f) = \frac{C_i(f)}{C_o(f)}, \quad (3)$$

输出信号的调制度为<sup>[12]</sup>

$$C_i(f) = \frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}_{\max} + \bar{I}_{\min}}, \quad (4)$$

其中  $\bar{I}_{\max}$  和  $\bar{I}_{\min}$  是光纤采样的最大值和最小值的均值。令输入信号的调制度  $C_o(f) = 1$ , 得到

$$\text{MTF}(f) = \frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}_{\max} + \bar{I}_{\min}}, \quad (5)$$

$R$  为光纤半径,  $\varphi$  是描述输入信号与光纤的位相匹配的量,它表示输入信号的最大值与光纤位相偏置,  $\varphi$  从 0 变化到  $2\pi$ 。图 1 表示的是相位偏置为  $\varphi_0$ 。

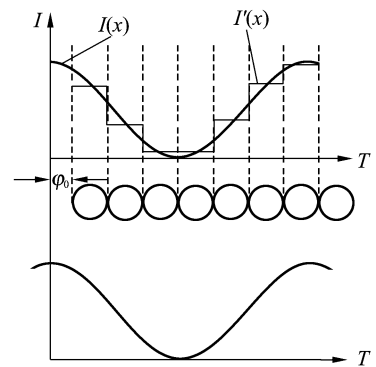


图 1 输入图样与光纤束的偏置

Fig. 1 Phase offset between the input pattern and the bundles

当输入信号的频率一定时,通过光纤采样,就可以得到  $\bar{I}_{\max}$  和  $\bar{I}_{\min}$ 。将得到的空间的极大值和极小值数据分别取平均,即

$$\bar{I}_{\max} = \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} I_{\max i}$$

$$\bar{I}_{\min} = \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} I_{\min i}, \quad (6)$$

其中  $n_m$  为光纤束极大值输出光纤个数,  $m_m$  为极小值输出光纤个数。将式(6)代入式(5),得到其输出调制度

$$\text{MTF}(\varphi) = \frac{\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} I_{\max i} - \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} I_{\min i}}{\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} I_{\max i} + \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} I_{\min i}}, \quad (7)$$

### 3 仿真分析

对线排列光纤传像束(如图 1 所示,几千根光纤排成一线)的调制传递函数仿真时,输入为正弦光栅像  $g(u)$ ,输出为经过光纤束传输扫描的像  $I(u')$ 。其中

$$g(u) = 1 + \cos 2\pi f u, \quad (8)$$

$f$  为空间频率,第  $i$  个  $\Delta u$  的位置  $u_i$  为

$$u_i = u_0 + \Delta u \times i, \quad (9)$$

$\Delta u$  为采样间隔,  $u_0$  为初相位,  $u$  从 0 取到  $u_0 + n \times D$ 。光纤的直径  $D = 2R$ ,  $n$  为光纤个数。如图 2 所示,第  $i$  个  $\Delta u$  的面积为

$$m_i = \int_{(i-1)\Delta u}^{i\Delta u} \sqrt{R^2 - u^2} du, \quad (10)$$

$m_i$  为如图 2 所示的阴影面积。要计算的是

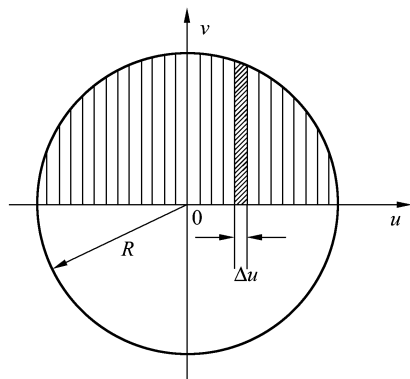


图 2 光纤采样示意图

Fig. 2 Sampling sketch map of the fiber-optic

整个光纤被  $a = \frac{R}{\Delta u}$  个平行于直径的线切割出来的每一个  $\Delta u$  的面积,光纤截面面积  $S = \pi R^2$ 。则  $S = 2 \sum_{i=1}^a m_i$ ,被切割出来的每一个  $\Delta u$  的面积占光纤截面总面积的百分比为  $M_i$

$$M_i = \frac{2m_i}{S}, \quad (11)$$

对输入  $g(u)$  按采样间隔  $\Delta u$  取值,第  $i$  个  $\Delta u$  的输入  $g_i$  为

$$g_i = 1 + \cos 2\pi f(u_0 + \Delta u \times i), \quad (12)$$

第  $j$  根光纤输出  $I_j$  为

$$I_j = \sum_{\substack{i=2aj \\ k=2a \\ i=2a(j-1) \\ k=1}}^{i=2aj \\ k=2a} g_i \times M_k, \quad (13)$$

找极值  $I_m$

$$I_m = \begin{cases} I_{\min i} = I_j & (I_{j+1} - I_j)(I_j - I_{j-1}) < 0 \text{ and } I_j < I_{j-1} \\ I_{\max i} = I_j & (I_{j+1} - I_j)(I_j - I_{j-1}) < 0 \text{ and } I_j > I_{j-1} \end{cases}, \quad (14)$$

根据式(6)、(7)得到一个初相位  $u_0$  和一个空间频率  $f$  所对应的调制传递函数值。取不同的初相位值所得的 MTF 用样条插值的方法拟合出 MTF 与相位关系曲线。

对线排列光纤传像束的相位关系作仿真,即取不同的初相位得到不同的调制传递函数值。取光纤的直径  $D = 26 \mu\text{m}$ ,采样间隔  $\Delta x = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $n = 1\ 000$ ,  $f_N$  为 Nyquist 频率,  $f = f_N, \frac{f_N}{2}, \frac{f_N}{4}, \frac{f_N}{8}$  时,MTF

与相位的关系如图 3 所示,位相变化为  $0 \sim 4\pi$ 。从图 3 可以看出,由于光纤的离散采样,输入信号与光纤束位相匹配对调制传递函数结果有一定的影响,调制传递函数值随位相呈周期性变化;在 Nyquist 整数分频处,位相匹配对 MTF 影响随频率增大而增大。

### 4 检测方法

在实验室中,采用显微物镜投影法测

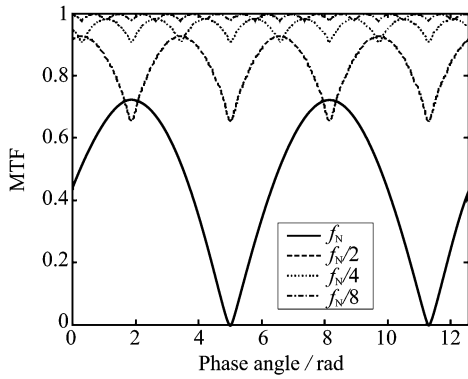


图 3 MTF 与相位的关系

Fig. 3 MTF-phase relationship

量线列光纤传像束的调制传递函数。检测设备如图 4 所示,该设备采用电视检焦,其电视 CCD 靶面和分辨率板与线列光纤传像束的像元面互为共轭像面,以满足调焦精度要求,在线列光纤传像束方向上为调制输入(采用矩形分辨率板)。物镜采用  $8/0.2$ 。这种投影方法的优点是降低了对分辨率板加工精度的要求,有利于实现检焦、调焦功能。在线列光纤束的调制传递函数检测中实现较方便,但由于物镜视场范围的限制,此方法不能实现全视场检测。但在 CCD 定位系统中,采用了 He-Ne 激光干涉仪测距,其分辨率  $0.1 \mu\text{m}$ ,精度  $0.3 \mu\text{m}$ ,

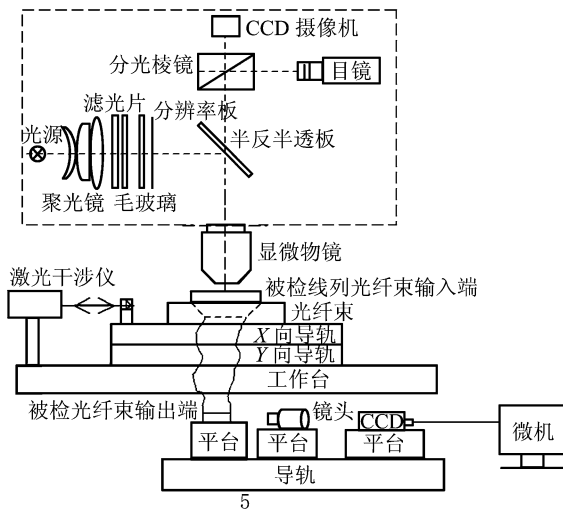


图 4 检测装置原理图

Fig. 4 Sketch map of experiment equipment

而光纤束始终向同一方向移动,因此可以进一步消除线列光纤传像束相对位置的定位误差。因此,实现对光纤束像元和信号相位的均匀采样,达到与全视场同样的测量效果。这种方法是等间隔单方向的移动光纤束,测量分辨率板中心视场附近的光纤束像元输出,这样可以消除边缘效应,在全视场推扫测得的极大值和极小值利用公式(7)计算调制传递函数。

扫描检测方法要求光源稳定,在本实验装置中采用溴钨灯光源,并且可使用不同滤光片进行测量特定光谱的 MTF,本实验采用的滤光片波长为  $542.5 \text{ nm}$ 。在检测过程中,应注意线列光纤传像束的移动间隔要均匀,保证相位和像元的均匀采样,这样做的最大优点是能得到全部像元采样和相位均匀分布平均的综合评价结果。对于南京春辉科技实业有限公司根据需要定做的由 2 000 根光纤组成的传像束,传像束的一端是由 2 000 根光纤成一线排开的,另一端则是由 2 个 1 000 根光纤组成的 2 个独立线列。像元间隔尺寸为  $26.3 \mu\text{m}$ ,如果使用推扫方法检测,每移步长为  $1 \mu\text{m}$ ,则需要走  $2\,000 \times 26.3$  步,显然这种方法在检测中工作量太大。因此,在实际检测过程中,采用 MTF 局部检测方法。

## 5 实验结果

在 Nyquist 频率下,采用中心视场记录一个  $0 \sim 2\pi$  相位均匀采样,然后测得的极大值和极小值按公式(6)和(7)计算 MTF,局部区域的 MTF 检测分别设在线列光纤传像束的光纤排列较好(光纤端面齐,每根光纤传光效果好)的两段。

在测量过程中,由于采用的是矩形分辨率板(条纹周期  $0.4 \mu\text{m}$ ),MTF 与对比调制函数(CTF)的关系,可以得到 MTF 结果。

$$\text{MTF}(f) = \frac{\pi}{4} \left[ \text{CTF}(f) + \frac{\text{CTF}(3f)}{3} - \frac{\text{CTF}(5f)}{5} + \frac{\text{CTF}(7f)}{7} - \dots \right], \quad (15)$$

由于 Nyquist 频率高倍频信号的对比传递函数很小,可以忽略不计,实际计算中只取右边第 1 项。

又由于分辨率板的对比度  $C = 8.02$ , 因此  $\text{MTF}_0 \neq 1$ , 应为

$$M_0 = \frac{C-1}{C+1} = 0.78, \quad (16)$$

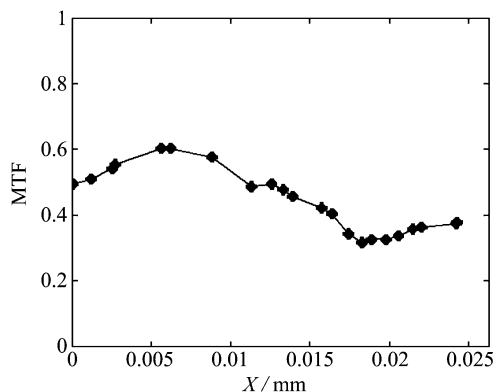
在光学系统 MTF 测量中,需要对测量结果进行零频归一化,即为

$$\text{MTF}(f) = \frac{\text{MTF}_{\text{测}}(f)}{\text{MTF}_{\text{测}}(f_N/128)}, \quad (17)$$

其中  $\text{MTF}_{\text{测}}(f_N/128)$  实测值为 0.9880。实际测量利用式(3)、(15)、(16)和(17)进行修正。

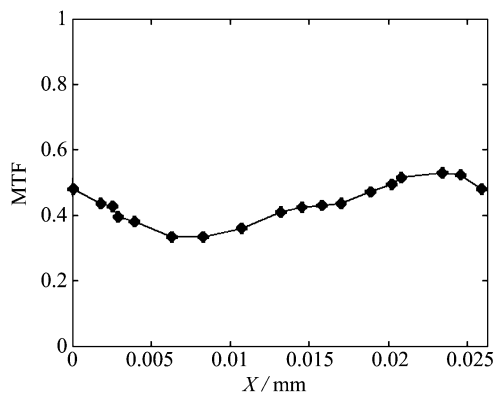
对选定的第 1 段光纤束的采样数据进行处理,计算在不同的相位情况下的 MTF,将图 3 中的弧度坐标转换成位置坐标,画出了在一个像元周期内 MTF 的变化曲线,如图 5(a)所示。对选定的第 2 段光纤束的采样数据进行处理,计算在不同的相位情况下的 MTF,其结果如图 5(b)所示。通过对 2 段不同光纤列的测量结果显示,输入信号与光纤传像束的位相匹配对 MTF 有影响;对于在 Nyquist 频率处,MTF 值变化范围较大。

通过对图 3 和图 5 比较不难发现,除幅值大小有差异外,2 条曲线的变化趋势是很吻合的。由于理论结果是在光纤传像束为理想情况下获得的。而在实际测量中,光纤传像束本身的影响,这取决于线列光纤束的加工工艺,例如光纤排列端面不齐,单个光纤直径有误差;在整个系统中产生杂散光导致输入的调制下降,在光纤输出端镜头成像对调制传递函数的影响;这些必然引起输出调制下降。



(a)第 1 段光纤束

(a)Front of the optic-fiber bundles



(b)第 2 段光纤束

(b)Back of the optic-fiber bundles

图 5 调制传递函数与位相关系

Fig. 5 Relationship between the MTF and phase

## 6 结 论

检测结果包含线列光纤束像元线列面不平度、光纤不均匀及投影系统的杂散光等诸多因素,并且选取传像束不同位置的 2 段分别进行测量,该数据结果是综合而全面的。由于有了精确的位置测量手段,采用局域小视场测量方法,能够实现线列光纤传像束调制传递函数的全视场综合评价,通过实验验证了输入图样与光纤束的位相匹配对调制传递函数的影响规律。因此应根据光纤束的这一特性全面而综合的评价光纤束传像系统传像性能。

## 参考文献:

- [1] 迟学芬,韩昌元. 基于信息理论的采样成像系统评价方法[J]. 光学精密工程,2003,11(2):207-211.  
CHI X F, HAN CH Y. Assessment of sampled imaging system based on information-theory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,11(3):207-211. (in Chinese)
- [2] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程,2004,12(2):216-220.  
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004,12(2):216-220. (in Chinese)
- [3] 李佳列,丁国清,颜国正,等. 采用CCD的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学精密工程,2002,10(6):281-284.  
LI J L, DING G Q, YAN G ZH, *et al.* Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(6):281-284. (in Chinese)
- [4] TEIPEN B T, MACFARLANE D L. Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurements of charge-coupled-device video camera systems[J]. *Applied Optics*, 2000,39(4):515-525.
- [5] OUANDJI F, POTTER E, CHEN W R, *et al.* Characterization of a CCD-based digital X-ray imaging system for small-animal studies: properties of spatial resolution[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13):2420-2427.
- [6] AREFIEV A. Method for evaluation of fibre optic components MTF[J]. *SPIE*, 1995, 2507: 211-217.
- [7] BARNARD K J, BOREMAN G D. Modulation transfer function of hexagonal staring focal plane arrays[J]. *Optical Engineering*, 1991,30(12):1915-1919.
- [8] PLAYER M A. Spread functions and modulation transfer functions of fiber-optic bundles[J]. *Journal of Modern Optics*, 1988,35:1363-1372.
- [9] CONDE R, DEPEURSINGE C H, COQUOZ O, *et al.* Image quality in microendoscopy: limiting factors[J]. *SPIE*, 1993,2084:87-98.
- [10] RAVE E, KATZIR A. Ordered bundles of infrared transmitting silver halide fibers: attenuation, resolution and crosstalk in long and flexible bundles[J]. *Optical Engineering*, 2002,41 (7):1467-1468.
- [11] RAVE E, SHEMESH D, KATZIR A. Thermal imaging through ordered bundles of infrared-transmitting silver-halide fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 2000,76(14):1795-1797.
- [12] FELTZ J C, KARIM M A. Modulation transfer function of charge-coupled devices[J]. *Applied Optics*, 1990,29(5):717-722.

作者简介:王慧(1975—),女,长春人,现在攻读中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学专业博士,主要研究方向为超光谱成像。E-mail:315 wang hui@sina.com