

文章编号: 1003-501X(2006)02-0069-04

两种排列方式光纤传像束的像质评价

王 慧^{1,2,3}, 向 阳³, 禹秉熙³

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 空军航空大学, 吉林 长春 130022;

3. 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)

摘要: 根据调制传递函数对比度定义, 推导了线列光纤传像束调制传递函数(MTF)的数理关系, 建立了光纤直径有随机误差的线列光纤传像束 MTF 仿真模型, 对 MTF 进行数值分析。通过考虑在光纤传像束中输入信号与光纤的位相匹配对 MTF 的影响, 分析了 V 型槽排列和紧密排列两种不同方式的光纤传像束的平均 MTF。结果显示, 有随机误差的光纤束的平均 MTF 值分别分布于理想传像束平均 MTF 曲线附近, 表明了光纤自身的误差对传像束的平均 MTF 影响不大; V 型槽排列的线列光纤束的像质优于紧密排列方式的线列光纤束。

关键词: 光纤传像束; 调制传递函数; 位相匹配; 随机误差; 像质评价

中图分类号: O439

文献标识码: A

Average modulation transfer function of two kinds of fiber-optic image bundles

WANG Hui^{1,2,3}, XIANG Yang³, YU Bing-xi³

(1. ChangChun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

3. State Key Lab for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, 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 with fiber-optic diameter random error was established, and digital analysis for MTF was carried out. The MTF has been carefully evaluated by considering the influence of phase match on the MTF between input pattern and fiber-optic image bundles. Taking into consideration accumulative error of fibers, the average MTF is analyzed on the V slot and the tightness array pattern about the fiber-optic image bundles. Simulation results show that the MTF values of fiber-optic image bundles with random error is near the MTF values of ideal image bundles, so the influence of the fiber-optic error on the MTF is little. The image quality of V slot array fiber-optic image bundles is better than that of tightness array pattern fiber-optic image bundles.

Key words: Fiber-optic image bundles; Modulation transfer function; Phase matching; Random errors; Image evaluation

引 言

与传统光学成像系统相比, 光纤传像束具有柔性传像、使用空间自由度大、易实现细长结构传像、重

收稿日期: 2005-01-13; 收到修改稿日期: 2005-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(60378015), 中科院知识创新工程(C02L07Z)资助项目

作者简介: 王 慧(1975-), 女(汉族), 吉林长春人, 博士, 主要研究方向为光学遥感、光学显示。E-mail: 315_wang_hui@sina.com

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很重要了。调制传递函数是评价成像系统性能的重要指标之一^[1]。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^[2-5]。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^[6]。

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 对频率的关系公式^[7]。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^[8]。M. A. Player 提出用“狭缝^[9]”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 ^[10]”, 从伦奇刻线图中得出传函关系, 并做 MTF 曲线。Rave^[11, 12] 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 V 型槽排列和紧密排列两种不同排列方式的光纤传像束的平均调制传递函数。

1 原 理

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

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

式中 $I(x)$ 为正弦物的光强度, $C_o(f)$ 为物的调制度, f 为空间频率, ϕ 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

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

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

$$MTF(f) = C_i(f) / C_o(f) \quad (3)$$

输出信号的调制度为^[13]

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

式中 \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

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

传像束像元与输入图样之间的对准直接影响 MTF 值。 ϕ 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, ϕ 从 0 变化到 2π 。图 1 表示的是相位偏置 ϕ_0 。

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

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\max} &= (1/n) \sum_{i=1}^n I_{\max i} \\ \bar{I}_{\min} &= (1/m) \sum_{i=1}^m I_{\min i} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 n 为光纤束极大值输出光纤个数, m 为极小值输出光纤个数。

将(6)式代入(5)式, 得到其输出调制度

$$MTF(\phi) = \frac{(1/n) \sum_{i=1}^n I_{\max i} - (1/m) \sum_{i=1}^m I_{\min i}}{(1/n) \sum_{i=1}^n I_{\max i} + (1/m) \sum_{i=1}^m I_{\min i}} \quad (7)$$

相应得出 t 个不同的 MTF , MTF 的均值 MTF_a 为

$$MTF_a = (1/t) \sum_{i=1}^t MTF_i \quad (8)$$

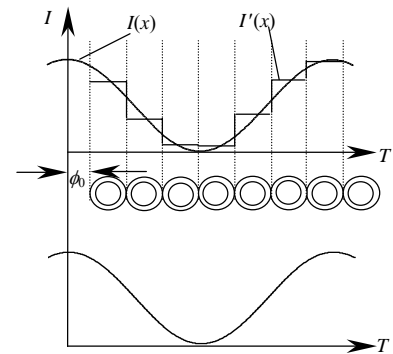


图 1 输入图样与光纤束的偏置
Fig.1 Phase offset between the input pattern and the bundles

2 仿真分析

对 V 型槽排列的线排列光纤传像束(如图 2 所示)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

$$g(u) = 1 + \cos(2\pi fu) \quad (9)$$

式中 f 为空间频率。第 i 个 Δu 的位置 u_i 为

$$u_i = u_0 + i\Delta u \quad (10)$$

式中 Δu 为采样间隔, u 从 0 取到 $u_0 + \sum_{k=1}^n D_k$, u_0 为初相位。光纤本身存在随机误差, 第 k 根光纤的直径 $D_k = 2R_k$, n 为光纤总数。V 型槽间距为 p , 光纤要放在 V 型槽内, 其直径必小于等于 p , 故使用 V 型槽排列方式可控制累积误差, 使累积误差很小。如图 3 所示, 对于第 k 根光纤而言, 第 i 个 Δu 的面积为

$$m_{ki} = \int_{(i-1)\Delta u}^{i\Delta u} \sqrt{R_k^2 - u^2} du \quad (11)$$

如图 3 所示的第 k 根光纤的阴影面积即为 m_{ki} 。要计算的是以光纤为中心的间隔为 p 的外环被 $a = p/\Delta u$ 个平行于直径的线切割出来的每一个 Δu 的面积 m_k 。由于光纤本身存在随机误差, 光纤与光纤之间有间距, 在光纤外即间隙内 $m_k = 0$, 光纤截面面积 $S_k = \pi R_k^2$ 。则 $S_k = 2 \sum_{i=1}^a m_i$, 被切割出来的每一个 m_k 面积占光纤截面总面积的百分比为 M_k

$$M_k = 2m_k / S_k \quad (12)$$

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

$$g_i = 1 + \cos 2\pi f(u_0 + i\Delta u) \quad (13)$$

第 j 根光纤输出 I_j 为

$$I_j = \sum_{i=2a(j-1), k=1}^{i=2aj, k=2a} g_i M_k \quad (14)$$

找极值 I_m :

$$I_m = \begin{cases} I_{\min i} = I_j, & (I_{j+1} - I_j)(I_j - I_{j-1}) < 0 \text{ and } I_j < I_{j-1} \\ I_{\max i} = I_j, & (I_{j+1} - I_j)(I_j - I_{j-1}) < 0 \text{ and } I_j > I_{j-1} \end{cases} \quad (15)$$

根据(7)式和(8)式得到一个初相位 u_0 和一个空间频率 f 所对应的调制传递函数值, 相应得出 t 个不同的 MTF , 取平均得到 MTF 的均值 MTF_{a0} 。

在满足采样定理的条件下取不同的空间频率, 得到相应空间频率所对应的调制传递函数值。用三阶多项式回归的方法拟合出调制传递函数曲线。

对于紧密排列方式的光纤传像束(如图 4 所示)做仿真时, 与 V 型槽排列方式比较, 不同之处在于 V 型槽排列方式光纤的间距是固定值, 而紧密排列方式光纤间距是随光纤直径变化而变化的, 紧密排列方式的累积误差大, 但可以控制在 $2\mu\text{m}$ 以内。则 $a_k = D_k/\Delta u$, $S_k = 2 \sum_{i=1}^{a_k} m_i$, 第 j 根光纤输出 I_j 为

$$I_j = \sum_{i=2a_k(j-1), k=1}^{i=2a_k j, k=2a_k} g_i M_k \quad (16)$$

其余均与 V 型槽排列方式相同, 拟合出平均 MTF 曲线。

对 V 型槽排列的光纤传像束作仿真, 取光纤的直径 $D = 30\mu\text{m}$ 。光纤本身存在随机误差, 光纤误差为 $-2 \sim 0\mu\text{m}$, 采样间隔 $\Delta u = 0.01\mu\text{m}$, $n = 1000$, 仿真结果如图 5 所示。图中实线表示无随机误差时光纤束的平均 MTF 曲线, 点表示有随机误差时光纤束的 MTF 的均值 MTF_{a0} 。

对紧密排列的光纤传像束作仿真, 取光纤的直径 $D = 30\mu\text{m}$, 光纤本身存在随机误差, 光纤误差为 $-2 \sim 0\mu\text{m}$, 采样间隔 $\Delta u = 0.01\mu\text{m}$, $n = 1000$, 仿真结果如图 6 所示。图中实线表示无随机误差时光纤束的平均 MTF 曲线, 点表示有随机误差时光纤束 MTF 的均值 MTF_{a0} 。

3 结 论

从图 5 和图 6 可以看出, 有随机误差时传像束的平均 MTF 值分别分布于理想传像束平均 MTF 的周围,

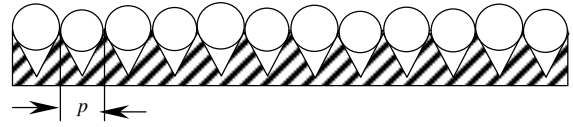


图 2 V 型槽排列方式

Fig.2 V slot array pattern

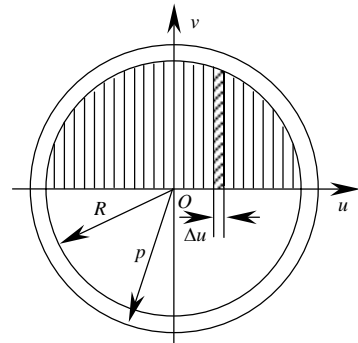


图 3 光纤采样示意图

Fig.3 Sketch of the fiber-optic sampling

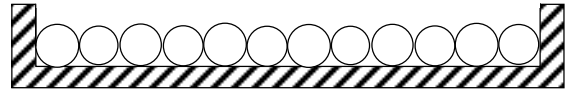
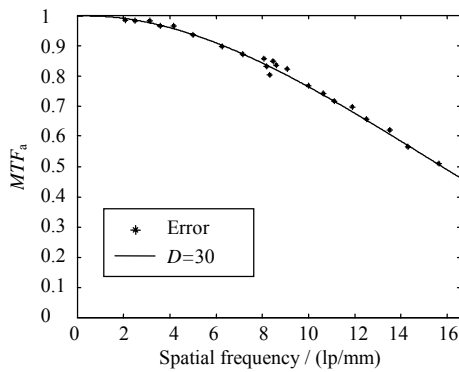
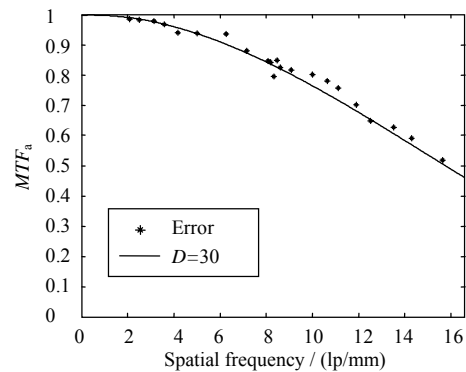


图 4 紧密排列方式

Fig.4 Tightness array pattern

图 5 平均 MTF 曲线Fig.5 Average MTF curve图 6 平均 MTF 曲线Fig.6 Average MTF curve

光纤自身的误差对传像束平均 MTF 影响不大。在输入正弦光栅的空间频率小于 Nyquist 频率时, 调制传递函数值随频率的增大而减小; 在 Nyquist 频率处, 调制传递函数的值约为 0.5。

参考文献:

- [1] Brian T. TEIPEN, Duncant L. MACFARLANE. Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurement of charge-coupled-device video camera systems [J]. **Applied Optics**, 2000, **39**(4): 515-525.
- [2] Ephim GOLBRAIKH, Norman KOPEIKA. Changes in modulation transfer function and optical resolution in helical turbulent media [J]. **Journal of the Optical Society of America A**, 2002, **19**(9): 1774-1778.
- [3] 阎 丽, 朱耆祥, 毛羽国, 等. 光纤耦合成像系统的光学传递函数计算和分析[J]. 光电工程, 1996, **23**(1): 29-34.
YAN Li, ZHU Qi-xiang, MAO Yu-guo, et al. Calculation and Analysis of optical transfer function of the coupling imaging system for optic fiber [J]. **Opto-electronic Engineering**, 1996, **23**(1): 29-34.
- [4] 车双良, 汶德胜. 像元间隔对亚像元动态成像系统 MTF 的影响[J]. 光电工程, 2002, **29**(2): 28-30.
CHE Shuang-liang, WEN De-sheng. Effects of pixel space on modulation transfer function of subpixel dynamic imaging system [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2002, **29**(2): 28-30.
- [5] 许世文, 姚新程, 付 苓. 推帚式 TDI CCD 成像时象移影响的分析[J]. 光电工程, 1999, **26**(1): 60-63.
XU Shi-wen, YAO Xin-cheng, FU Ling. An analysis for the influence of image motion on push-broom TDI-CCD imaging[J]. **Opto-Electronic Engineering**, 1999, **26**(1): 60-63.
- [6] Fabrice OUANDJI, Eric POTTER, Wei R. CHEN, 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.
- [7] Alexander AREFIEV. Method for evaluation of fibre optic components MTF [J]. **SPIE**, 1995, **2507**: 211-217.
- [8] Kenneth J. BARNARD, Glenn D. BOREMAN. Modulation transfer function of hexagonal staring focal plane arrays[J]. **Optical Engineering**, 1991, **30**(12): 1915-1919.
- [9] M. A. PLAYER. Spread functions and modulation transfer functions of fiber-optic bundles [J]. **Journal of Modern Optics**, 1988, **35**(4): 1363-1372.
- [10] Ramiro CONDE, Christian DEPEURSINGE, Olivier COQUOZ, et al. Image Quality in Microendoscopy: Limiting Factors[J]. **SPIE**, 1993, **2084**: 87-98.
- [11] Eran RAVE, Abraham KATZIR. 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.
- [12] E. RAVE, D. SHEMESH, A. KATZIR. Thermal imaging through ordered bundles of infrared-transmitting silver-halide fibers [J]. **Applied Physics Letters**, 2000, **76**(14): 1795-1797.
- [13] John C. FELTZ, Mohammad A. KARIM. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. **Applied Optics**, 1990, **29**(5): 717-722.