

线列光纤传像束的对比度调制传递函数<sup>\*</sup>金 辉<sup>1,2</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)

摘要: 根据对比度传递函数的定义, 推导出线列光纤传像束对比度调制传递函数的表达式, 采用数值计算的方式, 仿真分析了线列光纤传像束的对比度调制传递函数。仿真结果表明, 输入信号与光纤束位相匹配对对比度调制传递函数结果有一定的影响, 对比度调制传递函数值随位相呈周期性变化。在输入的空间频率小于 Nyquist 频率时, 对比度调制传递函数值随频率的增大而减小。

关键词: 线列光纤传像束; 对比度; 对比度调制传递函数

中图分类号: O439 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2006)01-0094-04

Line-array fiber-optic image bundles on the contrast transfer function<sup>\*</sup>JIN Hui<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: With the definition of the contrast transfer function (CTF), CTF expression of line-array fiber-optic image bundles is established, the influence of phase matching between input signal and line-array fiber-optic image bundles on the contrast transfer function is carried out by digital analysis. The results show that alignment between pixels of image bundle and input pattern has cyclic variation on measure result of the CTF. When frequency of the input pattern is less than Nyquist frequency, the CTF value decreases with increase of the frequency.

Key words: Line-array fiber-optic image bundles; Contrast; Contrast transfer function

## 0 引 言

在现代光学成像系统中, 离散光学成像系统已得到越来越广泛的应用, 因此, 带离散采样的光学成像系统的像质评价问题也变得更加重要。S.Park, F.

Chazallet, W.Wittenstien, J.C. Feltz 等人利用光学传递函数(OTF)的方法对此进行了研究。由于 OTF 的客观性和全面性, 它已被公认为评价光学系统成像质量的理想指标, 但离散光学成像系统中的探测器因具有空间离散性(采样特性), 而在理论上不存在传递函数<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2005-09-15; 修订日期: 2005-10-22

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60378015); 中国科学院知识创新工程资助项目(C02L07Z)

作者简介: 金辉(1979-), 女, 吉林长春人, 硕士生, 主要研究方向为光纤传像束的光学传递函数。

但是可以利用平均离散点扩散函数的概念, 得到离散光学成像系统的统计 OTF, 由此得到的 OTF 将有确定的定义而具有统一性和可比性。Alexander Arefiev 提出“用点扩散函数推导光纤传像元件的传递函数”, 并提出一种使用“可变狭缝”作为测量物的测量方案<sup>[2]</sup>。Kenneth J. Barnard 等人提出对六角形排列光纤探测器光学传递函数的理论推导, 做出平均传递函数曲线<sup>[3]</sup>。M. A. Player 提出用“狭缝”作为物推导多芯光纤束的平均传递函数, 并测得平均传递函数<sup>[4]</sup>。Ramiro 提出“伦奇刻线图对比测传递函数”, 从伦奇刻线图中得出传函关系, 并做出平均传递函数曲线<sup>[5]</sup>。Rave 利用边缘扩散函数计算调制传递函数, 从而做出 MTF 曲线<sup>[6,7]</sup>。宋治等人在算法上基于伪白化叠加方法, 根据退化图像估计调制传递函数(MTF), 然后根据最小相位的理论推导出点扩展函数的精确解<sup>[8]</sup>。在测量方法上, 李华等人对斜缝法 MTF 测量进行了探讨和研究<sup>[9]</sup>。

OTF 通常为复数, 因此它有模(绝对值)和幅角。在与对比度有关时称为对比度调制传递函数(CTF)。利用对比度的方法对离散成像系统的光学传递函数进行分析和计算, 画出平均对比度调制传递函数曲线, 并得出对比度调制传递函数值随位相变化的关系曲线。

离散成像系统包括离散像素阵列探测器, 成像光纤束输入端面 and 光纤面板等, 为了易于具体说明, 下面以线列光纤传像束作为典型的离散成像系统进行分析。

## 1 理论推导

由于光学系统的衍射和像差的影响, 使像的对比度有所下降。如果去除光学系统的光吸收和表面反射损失等因素, 把像的平均光强度(相当于  $I_0$ ) 仍规划为 1, 由于像的振幅  $b$  总要低于物的振幅  $b$ , 因此必然有  $C < C_0$ 。物的对比度一般是固定的, 不随物的空间频率  $f$  而改变, 而且通常又使物的对比度  $C=1$ 。

根据对比度定义, 设投射在线列光纤传像束上的信号分布为:

$$I(x) = C_0(f) (P - \quad) \quad (1)$$

式中  $I(x)$  为物的光强度;  $C_0(f)$  为物的对比度;  $f$  为空间频率;  $P$  为矩形光栅的条纹宽度;  $\quad$  为输入信号的

位相。经光纤传像束传播, 在光纤传像束输出端上的光强分布为:

$$I(x) = C_i(f) (P - \quad) \quad (2)$$

式中  $I(x)$  为像的光强度;  $C_i(f)$  为像的对比度;  $\quad$  为输出信号的位相。则光纤传像束的对比度调制传递函数为:

$$CTF(f) = \frac{C_i(f)}{C_0(f)} \quad (3)$$

输出信号的对比度为<sup>[10]</sup>:

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

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。令输入信号的对比度  $C_0(f)=1$ ,  $\quad$  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,  $\quad$  从 0 变化到  $P$ 。图 1 表示的是相位偏置为  $\phi_0$ 。

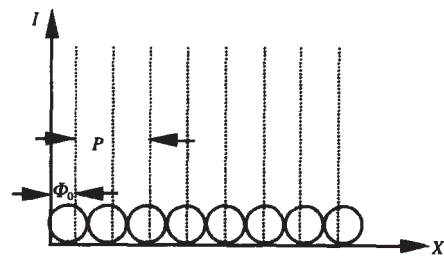


图 1 输入图样与光纤束的偏置

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:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\max} &= \frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} \bar{I}_{\max i} \\ \bar{I}_{\min} &= \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} \bar{I}_{\min i} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $n_m$  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。将公式(5)代入公式(4), 得到其输出对比度:

$$CTF(f) = \frac{\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} \bar{I}_{\max i} - \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} \bar{I}_{\min i}}{\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} \bar{I}_{\max i} + \frac{1}{m_m} \sum_{i=1}^{m_m} \bar{I}_{\min i}} \quad (6)$$

## 2 仿真分析

对线排列光纤传像束 (图 1) 的对比度调制传递函数仿真时, 输入为矩形光栅像  $g(u)$ , 输出为经过光纤束传输扫描的像  $l(u)$ 。其中

$$g(u) = fu \quad (7)$$

式中  $f$  为空间频率。第  $i$  个  $u$  的位置  $u_i$  为:

$$u_i = u_0 + ui \quad (8)$$

式中  $u$  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  $u$  的面积为:

$$m_i = \int_{(i-1)u}^{iu} \sqrt{R^2 - u^2} du \quad (9)$$

式中  $m_i$  为图 2 所示的阴影面积。要计算整个光纤被  $a = \frac{R}{u}$  个平行于直径的线切割出来的每一个  $u$  的面

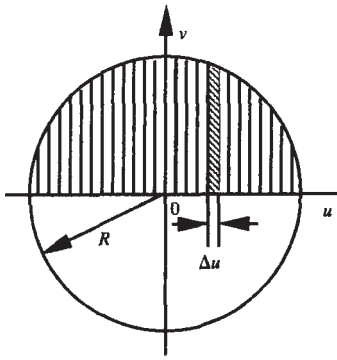


图2 光纤采样示意图

Fig.2 Sampling sketch map of the fiber-optic

积, 光纤截面面积  $S = R^2$ , 则  $S = 2 \sum_{i=1}^a m_i$ , 被切割出来的每一个  $u$  的面积占光纤截面总面积的百分比为  $M_i$ :

$$M_i = \frac{2m_i}{S} \quad (10)$$

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

$$g_i = f(u_0 + ui) \quad (11)$$

第  $j$  根光纤输出  $l_j$  为:

$$l_j = \sum_{i=2a(j-1)}^{i=2aj} g_i \cdot M_k \quad (12)$$

找极值

$$l_m = \begin{cases} l_{\min i} = l_j & (l_{j+1} - l_j)(l_j - l_{j-1}) < 0 \text{ 且 } l_j < l_{j-1} \\ l_{\max i} = l_j & (l_{j+1} - l_j)(l_j - l_{j-1}) < 0 \text{ 且 } l_j > l_{j-1} \end{cases} \quad (13)$$

根据公式(5)和(7)得到一个初相位  $u_0$  和一个空间频率  $f$  所对应的对比度调制传递函数值。取不同的初相位值所得的 CTF 用样条插值的方法拟合出 CTF 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对比度调制传递函数值。取光纤的直径  $D = 26 \mu\text{m}$ , 采样间隔  $x = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $n = 1000$ , 即  $f_N = 19.23 \text{ lp/mm}$ 。

$f_N$  为 Nyquist 频率, 在  $f$  取 19, 9.5, 4.75, 2.38 lp/mm 时, CTF 与相位的关系如图 3 所示。

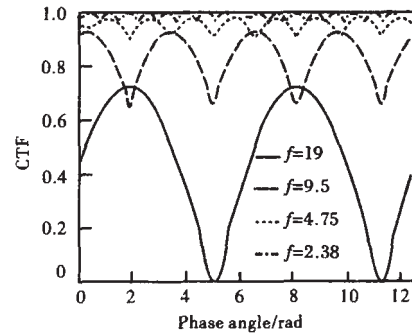


图3 CTF 与相位的关系

Fig.3 Relationship between CTF and phase

从仿真结果可以看出, 对比度调制传递函数值随输入空间频率与光纤传像束位相呈周期性变化; 在输入频率小于 Nyquist 频率时, 对比度调制传递函数值随频率的增大而减小。

## 3 结论

本文通过理论计算和仿真分析得出了线列光纤传像束的对比度调制传递函数与位相的关系。结果表明, 由于光纤的离散采样, 输入空间频率与光纤束位相匹配对对比度调制传递函数结果有一定的影响, 对比度调制传递函数值随位相呈周期性变化; 在输入频率小于 Nyquist 频率时, 对比度调制传递函数值随频率的增大而减小。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Yong, ZHAO Da-zun. Optical transfer function for discrete imaging systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(张勇, 赵达尊. 离散成像系统的光学传递函数. 北京理工大学学报), 1997, 17(2): 151-155.
- [2] AREFIEV. Method for evaluation of fibre optic components MTF [C]// Proceedings of SPIE, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors V, 1995, 2507: 211-217.
- [3] BAMARD K J, BOREMAN G D. Modulation transfer function of hexagonal staring focal plane arrays [J]. Optical Engineering, 1991, 30(12): 1915-1919.
- [4] PLAYER M A. Spread functions and modulation transfer functions of fiber-optic bundles [J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35: 1363-1372.
- [5] CONDE R, DEPEURSINGE C, COQUOZ O, et al. Image Quality in microendoscopy: limiting factors [C]// Proceedings of SPIE, Bio-medical Optoelectronic Devices and Systems, 1993, 2084: 87-98.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] SONG Zhi, ZHANG Tian-xu, HONG Han-yu. Fast restoration algorithm for a single vibration blurred image [J]. Infrared and Laser Engineering(宋治, 张天序, 洪汉玉. 单帧振动模糊图像的快速恢复算法. 红外与激光工程), 2003, 32(5): 516-520.
- [9] LI Hua, CHEN Liang-you, LEI Gang, et al. Analysis and implementation on canted slit-method for the test of MTF of infrared imaging systems [J]. Infrared and Laser Engineering(李华, 陈良友, 雷刚, 等. 斜缝法热像仪 MTF 参数测量的探讨和实践. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 201-208.
- [10] FELTA J C, KARIM M A. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. Applied Optics, 1990, 29(5): 717-722.

(上接第 77 页)

## 参考文献:

- [1] ZHAO Guang-xing. Improving of slit width measurement system [J]. Measurement Technology(赵光兴. 缝宽测量装置的一种改进. 计量技术), 2002, 2: 61-62.
- [2] JIANG Ding-ding, LI Kai-duan, ZHAO Yu-liang. Precise measurement of diameter of observing hole in interpretation lens by linear array CCD [J]. Infrared and Laser Engineering(蒋定定, 李开端, 赵育良. 用线阵 CCD 精确测量判读镜具观察孔直径. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 60-62.
- [3] LIU Yi-zu. The discussion of technique and method for improving noncontacting measurement precision of thread s diameter [J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition)(刘义族. 提高非接触式细丝直径测量精度的技术和方法探讨. 天津师范大学学报(自然科学版)), 2002, 22(2): 60-62.
- [4] ZHAO Yu-liang, XU Zhao-lin, LI Kai-duan. Development and expectation of CCD aeronautical recon system [J]. Optoelectronic Technology(赵育良, 许兆林, 李开端. 航空 CCD 电光侦察系统的发展现状与展望. 光电子技术), 2001, 12(4): 290-293.
- [5] WANG Qing-you. Applied Technique of CCD [M]. Tianjin: Publisher of Tianjin University(王庆有. CCD 应用技术. 天津: 天津大学出版社), 1993: 10.
- [6] XU Xiu-zhen, LI Zi-tian, XUE Li-jun. Analysis and processing of CCD noise [J]. Infrared and Laser Engineering(许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术. 红外与激光工程), 2004, 33(4): 343-346.
- [7] MIAO Chang-qing, WANG Bo, FU Meng-yin. Real-time image tracking system for moving targets by CCD [J]. Infrared and Laser Engineering(苗常青, 汪渤, 付梦印等. 实时 CCD 成像跟踪处理系统研究. 红外与激光工程), 2005, 34(3): 310-313.
- [8] KE Cai-jun, YI Xin-jian, LAI Jian-jun. Research on microlens array for improving the fill factor of CCD image sensors [J]. Infrared and Laser Engineering(柯才军, 易新建, 赖建军. 提高 CCD 图像传感器填充因子的微透镜阵列的研究. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 209-212.