

# 线列光纤传像束对比度传递函数研究

何 煦<sup>1,2</sup> 向 阳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 宽视场成像光谱仪采用线列光纤束进行视场折叠以改进其性能。作为一种特殊的光学元件, 线列光纤除了具有传像功能外, 还具有离散采样特性, 这需要采用新方法评价其成像性能。以对比度传递函数的定义为基础, 推导出线列光纤束的对比度传递函数解析表达式, 据此研究了线列光纤传像束对比度传递函数的特性。结果表明, 在极其靠近 Nyquist 频率及其分频的频域, 对比度传递函数呈现出振荡现象, 收敛速度与频率偏离量、光纤数相关, 随着光纤数的增多呈现出明显的收敛趋势; 在其他频域, 当光纤数小于 100 时, 对比度传递函数就收敛于平均值。对比度传递函数随初位置呈现出周期变化。

**关键词** 光纤光学; 线列光纤传像束; 对比度传递函数

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0706006

## Study on Contrast Transfer Function of Fiber-Optic Image Bundles

He Xu<sup>1,2</sup> Xian Yang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Fiber-optic image bundles are used by the wide view field, hyperspectral imager to fold view field in order to improve its performance. As a special optical element, the fiber-optic image bundles not only have the function of image transmission, but also have discrete sampling characteristics. Therefore, these require a new method to evaluate the image quality of fiber bundles. According to the definition of contrast, the contrast transfer function of fiber-optic image bundles is deduced. Accordingly, the characteristics of contrast transfer function of fiber-optic image bundles are studied. The simulation results show that the contrast transfer function shows a convergence characteristic at the domain very close to the Nyquist frequency and Nyquist frequency division. The convergence rate associates with the frequency deviation and the number of fibers in bundles. The contrast transfer function shows a clear convergence trend with the increase of fiber number, and converges to the average value at other frequency domain when fiber number is less than 100. In addition, contrast transfer function cycles oscillation with the change of initial position.

**Key words** fiber optics; fiber-optic image bundles; contrast transfer function

**OCIS codes** 060.2300; 060.2350; 110.3000; 110.4850

## 1 引 言

在传统光学成像系统中加入光纤传像束, 能够改善其性能、简化光路系统结构并减小其体积与重

量<sup>[1~3]</sup>。超光谱成像仪中使用线列光纤传像束作为视场分割器, 线列光纤束的成像质量直接影响成像光谱仪的整体性能。

**收稿日期**: 2010-11-12; **收到修改稿日期**: 2011-03-11

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA12Z143)和国家自然科学基金(60538020)资助课题。

**作者简介**: 何 煦(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统装调及检测技术研究等方面的研究。

E-mail: 911max@sina.com

**导师简介**: 向 阳(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密检测技术方面的研究。

E-mail: xiangy@sklao.ac.cn(通信联系人)

线列光纤传像束是一种特殊的光学元件,它不满足空间不变性,对图像的传输存在离散采样作用,需要新的方法与模型来评论其成像质量。目前许多实验室多采用明暗条纹(方波)来进行光学系统装调,测量和评价光学系统的对比度传递函数<sup>[4~7]</sup>。相关文献中采用分辨率等模型对光纤排列方式、占空比、光纤直径等特性对系统传、成像能力的影响进行了研究<sup>[8~10]</sup>。然而,目前还没有关于光纤传像束对比度传递函数(CTF)的研究和报道。所以,发展线列光纤传像束的对比度传递函数理论,对于实验室测量其成像特性、进行光学系统装调都具有十分重要的意义。本文研究了线列光纤传像束 CTF 的相关特性。

## 2 理论推导

线列光纤采样方波示意图,如图 1 所示,光纤采样方波放大图如图 2 所示。光纤传像束是紧密排列的,光纤外径为  $R$ ,芯径为  $r$ , $\delta$  为方波与首根光纤的初始位置差, $T$  为周期, $T_N$  为 Nyquist 周期, $l$  为频率偏移比,白色部分表示方波光强为  $I_m$ ,黑色部分对应方波光强为 0。由采样定理可知<sup>[11~13]</sup>,线列光纤传像束的 Nyquist 频率  $f_N$  可表示为

$$f_N = \frac{1}{2} \frac{1}{2R} = \frac{1}{4R}. \quad (1)$$

所以,应该在 Nyquist 频率以内考察线列光纤传像束的对比度传递函数。

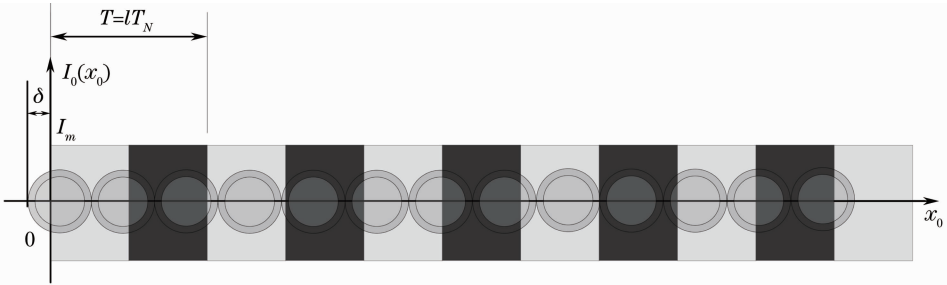


图 1 线列光纤采样方波示意图

Fig. 1 Mode of sampling of fiber-optic image bundles

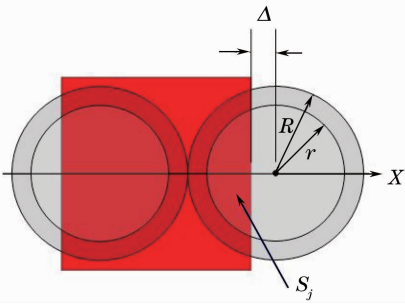


图 2 光纤采样方波放大图

Fig. 2 Enlargement of square wave sampled by fibers  
用归一化频率  $f$  表示入射方波的频率,即

$$f = \frac{f_N}{l} = \frac{1}{4Rl}. \quad (2)$$

那么,  $l \geq 1$ 。

光纤线列中第  $j$  根光纤采集到的信号强度可表示为

$$I'_j = I_m \frac{(\pi r^2 - S'_j)}{\pi r^2}, \quad (3)$$

式中

$$S'_j = 2 \int_{2jR-r+\Delta}^{2jR+r} \sqrt{r^2 - (x - 2jR)^2} dx = r^2 \arccos\left(\frac{\Delta}{r}\right) - \Delta \sqrt{r^2 - \Delta^2}. \quad (4)$$

忽略光纤传输损耗,根据对比度定义,线列光纤输出端信号的对比度可表示为

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

式中  $\bar{I}_{\max}$  和  $\bar{I}_{\min}$  分别为线列光纤中采样输出的极大值和极小值的均值,即

$$\begin{cases} \bar{I}_{\max}(f, \delta) = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^N I'_{\max a}(f, \delta) \\ \bar{I}_{\min}(f, \delta) = \frac{1}{M} \sum_{b=1}^M I'_{\min b}(f, \delta) \end{cases}, \quad (6)$$

光纤线列的 CTF 为

$$C(f, \delta) = \frac{C_o(f, \delta)}{C_i(f)}. \quad (7)$$

假设输入信号对比度  $C_i(f) = 1$ ,则线列光纤传像束的 CTF 可表示为

$$C(f, \delta) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N I'_{\max a}(f, \delta) - \frac{1}{M} \sum_{b=1}^M I'_{\min b}(f, \delta)}{\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N I'_{\max a}(f, \delta) + \frac{1}{M} \sum_{b=1}^M I'_{\min b}(f, \delta)}. \quad (8)$$

## 3 计算分析

在工程应用中,设计和测试人员往往更加关心

在 Nyquist 频率下,系统的 CTF<sup>[14,15]</sup>。因此,本文根据(8)式,重点计算分析在 Nyquist 频率及其分频附近,线列光纤传像束 CTF 与入射方波频域特性、初位置偏差、线列中光纤数等参量的普遍联系,并归纳其中的一般规律。

### 3.1 $f_N$ 频域 CTF 特性

根据(9)式,对于  $l=1.01, 1.001, 1.0001; l=1.03, 1.003, 1.0003$  和  $l=1.001, 1.003, 1.005, 1.007$  三组情况,在初位置  $\delta=r/5$  时,计算了线列光纤的 CTF 曲线分别如图 3(a)~(c)所示。

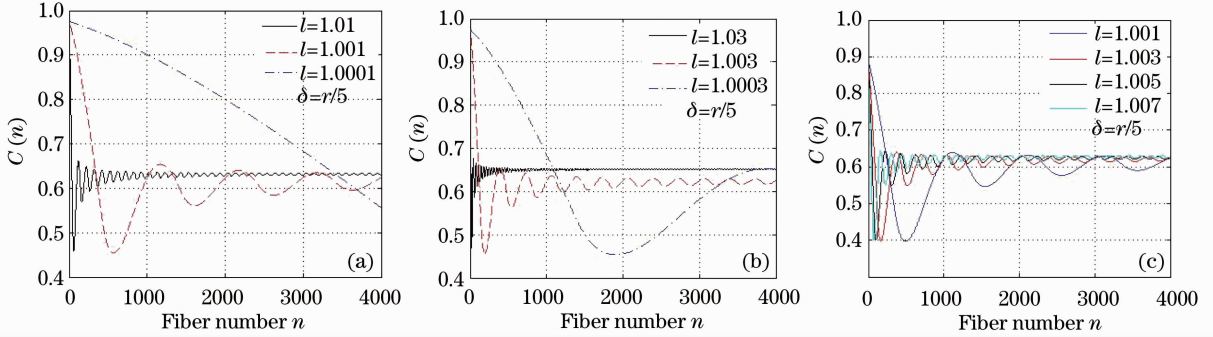


图 3  $f_N$  频域 CTF 曲线

Fig. 3 Curves of contrast transfer function with fiber number near the Nyquist frequency

图 3 表明,在极其靠近  $f_N$  的频域(不大于  $f_N$ ),CTF 呈现出振荡的现象:对于确定的照射频率,CTF 随着光纤数的增多呈现出明显的收敛特征;对于一定的光纤数,CTF 随着照射频率偏离  $f_N$  而振荡现象迅速消失。

表 1 中计算了入射方波频率在 Nyquist 频率附近频域取值时,当光纤数为 2000 根与 4000 根时对应 CTF 的差值。其中最大相差为 0.000239。

表 1 Nyquist 频率附近 CTF 差值( $\delta=r/5$ )

Table 1 Difference of CTF near the Nyquist frequency ( $\delta=r/5$ )

$f$	$f_N/1.002$	$f_N/1.004$	$f_N/1.006$
$C(2000)$	0.492411	0.510112	0.523303
$C(4000)$	0.492307	0.510319	0.523542
Difference	0.00104	-0.000207	-0.000239

### 3.2 Nyquist 分频频域附近 CTF 特性

照射方波频率为  $f_N/l$ ,取  $l=2.001, 2.004, 2.006$ ,给定初位置  $\delta=r/5$ ,CTF 曲线如图 4 所示。对比图 4 与图 3,可以归纳出相同的结论。

### 3.3 其他频域 CTF 特性

图 5 表明,在远离  $f_N$  频域,线列光纤 CTF 快速收敛。当光纤数达到约 500 根时,CTF 趋近一个固定值。

由图 3~5 可以归纳出,在极其靠近  $f_N/l(l=1, 2, 3, \dots)$  的频域,CTF 呈现出振荡的现象:对于确定的照射频率,CTF 随着光纤数的增多呈现出明显的收敛特征;在光纤数一定时,随着照射频率偏离  $f_N/l$ ,CTF 曲线的振荡现象迅速消失。

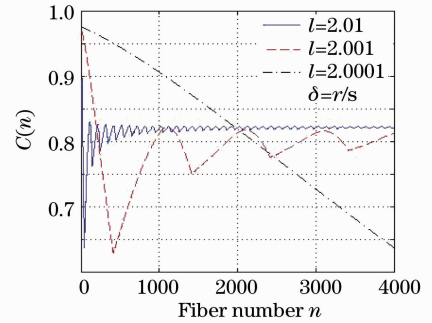


图 4  $f_N/2$  附近频域 CTF 曲线

Fig. 4 Curve of contrast transfer function with fiber number nearby Nyquist frequency-division

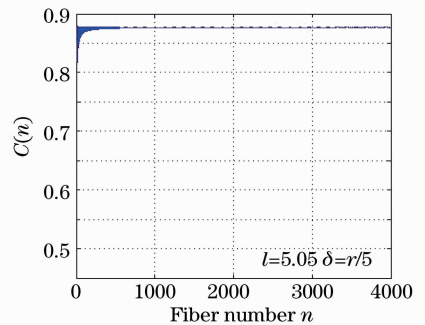


图 5 远离  $f_N$  频域 CTF 曲线

Fig. 5 Fast convergence of contrast transfer function at non-Nyquist frequency

### 3.4 $f_N$ 频域 CTF 随初位置变化的特性

以下在  $f_N$  频域考察 CTF 随初位置  $\delta$  的变化情况。在照射方波频率  $f_N/l$  一定( $l$  取 1.001, 1.005, 1.007),光纤数  $n=512, 1024$  和 2048 根时,根据(9)式,计算得到 CTF 变化曲线,如图 6 所示。图中横坐标为初位置偏移。

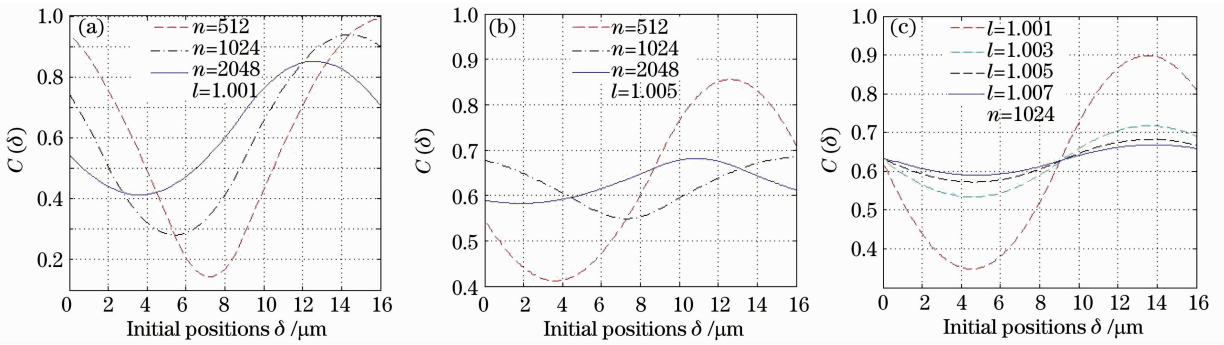
图 6  $f_N$  频域 CTF 随初位置变化曲线

Fig. 6 Function curves of contrast transfer function with initial positions nearby Nyquist frequency domain

图 6 的仿真结果表明:在极其靠近  $f_N$  的频域,初位置  $\delta$  对 CTF 有影响,当频率一定时,光纤数越少,CTF 对初位置的变化越敏感;当光纤数一定时,输入方波频率越靠近  $f_N$  初位置  $\delta$  对 CTF 的影响越大。

对于远离  $f_N/l$  的频域 ( $l=2.1, 2.3, 2.5, 2.7$ ), 光纤数  $n=1024$ , 计算了 CTF 随初位置  $\delta$  变化的曲线,如图 7 所示。

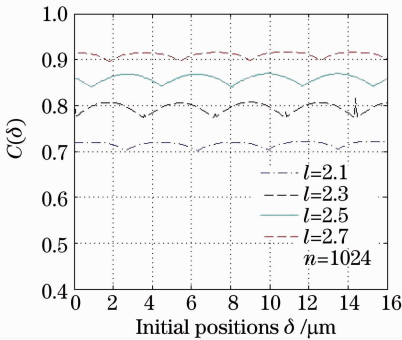
图 7 远离  $f_N$  频域 CTF 随初位置变化曲线

Fig. 7 Curves of contrast transfer function with initial position far from Nyquist frequency-division

图 7 表明,在远离  $f_N/l$  的频域,CTF 对初位置变化并不敏感,幅值差小于 0.01。

## 4 结 论

本文从对比度传递函数的定义出发,推导出线列光纤束的 CTF 解析表达式,据此研究了线列光纤传像束 CTF 的相关特性,得到如下结论:

1) 在极其靠近  $f_N$  的频域,CTF 呈现出明显的振荡现象,随着光纤数的增加 CTF 的振荡呈现出明显的收敛趋势。收敛速度与频率偏离量相关,频率偏离量越小,CTF 的收敛速度越慢,当频率偏离量小于 0.01% 数量级,当光纤数超过 4000 根后才出现收敛趋势。在其他频域,当光纤数很少时就出现

振荡收敛现象。

2) 在 Nyquist 频率附近频域,CTF 值随初位置偏差呈现周期变化趋势。线列中光纤数增加,初位置偏差对传递函数的影响减弱;而频率偏离量越小,CTF 对初位置变化越敏感。

## 参 考 文 献

- Zhou Dechen, Yu Fengxia, Tan Fang. Preparation and optical performance of high resolution optical fiber image bundle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 723~726  
周德春, 于凤霞, 谭芳. 高分辨率光纤传像束的制备及其光学性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 723~726
- Liu Yong, Wu Jiandong, Zhu Ling *et al.*. Spectral recovery in fiber Fourier transform spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1697~1700  
刘勇, 巫建东, 朱灵等. 光纤傅里叶变换光谱仪光谱复原技术研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1697~1700
- Yu Bin, Chen Danni, Sun Qiang *et al.*. Designing and analysis of new diffractive optical imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1260~1263  
于斌, 陈丹妮, 孙强等. 新型衍射光学成像光谱仪的设计和分折[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1260~1263
- Keith Krapels, Ronald G. Driggers, Richard H. Vollmerhausen. Atmospheric turbulence modulation transfer function for infrared target acquisition modeling [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(9): 1906~1913
- Robert E. Parks. Alignment of optical systems [C]. *SPIE*, 2006, **6342**: 634204
- Brian T. Teipen, Duncant L. MacFarlane. Liquid-crystal-display projector-based modulation transfer function measurements of charge-coupled-device video camera systems [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(4): 515~525
- Abraham Friedenber. Sampling-interpolation modulation transfer function as the envelope of the interpolated output[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(2): 520~526
- Paul W. Nugent, Joseph A. Shaw, Michael R. Kehoe *et al.*. Measuring the modulation transfer function of an imaging spectrometer with rooflines of opportunity[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(10): 103201
- Jiasheng Hu, Min Song, Yi Sun *et al.*. Measurement of modulation transfer function of charge-coupled devices using frequency variable sine grating patterns[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(7): 1200~1204
- Yuehao Wu, Caihua Chen, Zhongmin Wang *et al.*. Fabrication and characterization of a compressive-sampling multispectral

- imaging system[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(12): 123201
- 11 Damien P. Kelly, Bryan M. Hennelly, Nitesh Pandey *et al.*. Resolution limits in practical digital holographic systems[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(9): 095801
- 12 A. M. Tai. Two-dimensional image transmission through a single optical fiber by wavelength-time multiplexing [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3826
- 13 R. Hazra, C. L. Viles. Model-based frequency response analysis system for epifluorescence microscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(8): 1083~1091
- 14 Wang Hui, Xiang Yang, Yu Bingxi. Comprehensive estimating and measuring method of line-array fiber-optic image bundles based on the modulation transfer function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 185~190  
王 慧, 向 阳, 禹秉熙. 线列光纤传像束的调制传递函数评价方法及检测[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(2): 185~190
- 15 Arnold Daniels, Glenn D. Boreman, Alfred D. Dueharme. Random targets for modulation transfer function testing [C]. *SPIE*, 1993, **1969**: 184~192