

面阵光纤传像束与面阵 CCD 的像元耦合调制传递函数特性

何 煦¹, 袁 理^{1,2}, 靳淳琪², 张晓辉¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高分辨率成像光纤传像束制备工艺的进步使得传统高性能光电成像仪器具备柔性, 并且使仪器的体积和重量大幅减小。面阵光纤传像束和面阵 CCD 间的像元耦合离散采样效应, 导致了传统成像质量评价模型的局限性。从光强度呈余弦分布的光信号在面阵光纤传像束和面阵 CCD 中的传递过程出发, 建立了耦合离散采样系统的耦合调制传递函数(Coupled-MTF)模型, 研究了 Coupled-MTF 的收敛特性及其随像元耦合误差的变化规律等。研究表明, 若输入信号的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 1%, 当阵列中包含的像元总数超过 1000 时, Coupled-MTF 振荡收敛为固定值。输入信号的空间频率与奈奎斯特频率的偏差越小, Coupled-MTF 振荡收敛的速度越慢。Coupled-MTF 的振荡幅值在弧矢和子午方向不同, 且与各自方向的像元耦合误差有关。Coupled-MTF 随面阵光纤传像束与面阵 CCD 间的像元耦合误差周期振荡, 理论上振荡周期为包层直径。在奈奎斯特频率及其分频附近的频域, Coupled-MTF 在给定空间频率处不为固定值。上述特性有别于传统空不变成像系统的调制传递函数。

关键词 光纤光学; 面阵光纤传像束; 成像质量评价; 调制传递函数; 像元耦合误差; 振荡收敛

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0506002

Characteristics of Modulation Transfer Function of Pixel Coupling Between Array Fiber Image Bundles and Array CCD

He Xu¹, Yuan Li^{1,2}, Jin Chunqi², Zhang Xiaohui¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the advancements of imaging fiber bundle fabrication technology with high resolution, traditional high-performance photoelectric imaging instruments become flexible with greatly reduced volume and weight. However, traditional image quality evaluation models are limited by the pixel coupling discrete sampling effect of array fiber image bundles and array CCD. On the basis of the transfer process of grayscale cosine distribution optical signal in array fiber image bundles and array CCD, a mathematical model of coupled modulation transfer function (Coupled-MTF) for coupled discrete sampling system is established. Results show that the coupled-MTF converges to a fixed value when the deviation between an input signal spatial frequency and Nyquist frequency is 1% and the total number of pixels in the array is more than 1000. A small frequency deviation corresponds to a slow convergence velocity of the coupled-MTF oscillation. The oscillation amplitude of coupled-MTF differs in tangential and sagittal directions in a manner related to the corresponding pixel coupling deviation. The coupled-MTF periodically oscillates with the coupling deviation between the array fiber image bundles and the array CCD. One cycle is equivalent to the diameter of fiber cladding. The results show that the coupled-MTF shows different characteristics from the modulation transfer function of classical space invariant imaging system.

收稿日期: 2016-10-18; 收到修改稿日期: 2016-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61675198, 61307114)

作者简介: 何 煦(1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学装调方法、成像质量评价、光电测试仪器总体设计等方面的研究。E-mail: hexu_ciomp@sina.com

Key words fiber optics; array fiber image bundles; imaging quality evaluation; modulation transfer function; pixel coupled error; oscillation convergence

OCIS codes 060.2310; 220.1140; 220.4840; 120.3180

1 引 言

通过微纳加工方法,可将大量单根光纤依据一定规律进行排列,形成用于传递宽谱段光学图像的面阵光纤传像束。目前已获得的面阵光纤传像束质量良好,分辨率优于 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,包层直径小于 $8 \mu\text{m}$,且光谱范围包含可见光和近红外波段^[1]。

在光电成像系统中加入面阵光纤传像束,可显著改善系统的综合性能。例如,在拉曼成像系统中加入面阵光纤传像束可提高系统的信噪比,在高性能超广角镜头中使用面阵光纤传像束耦合面阵探测器可缩小光学系统的尺度,在航天超光谱成像仪中加入面阵光纤传像束可提高系统的刈幅宽度^[2-4]。

在以面阵 CCD 作为探测器的光电成像系统中加入面阵光纤传像束,系统所包含的两级耦合离散采样系统会导致传统成像质量评价模型存在局限性。Chiarulli 等^[5]通过实验研究了在光电环形回路中引入面阵光纤传像束后的系统成像质量。Seki 等^[6]讨论了影印成像系统中,单根光纤直径与成像质量的关系。Ford 等^[7]从信噪比和分辨率两方面探讨了在扫描源光学层析成像系统中加入面阵光纤传像束后系统成像质量的评价方法。

调制传递函数(MTF)可反映成像系统对不同空间频域的响应特性,可客观地评价系统成像质量。部分针对耦合离散系统的 MTF 数学模型仍是基于经典空不变假设或单个离散采样系统的离散傅里叶变换。例如,采用倾斜刃口扫描法评价同时含有面阵光纤传像束和面阵 CCD 的耦合采样系统,或采用级联相乘方法计算两级耦合离散采样系统的 MTF^[8-9]。从光强度呈余弦分布的光信号在面阵光纤传像束和面阵 CCD 中的传递过程出发,依据广义空不变假设和调制度定义讨论两级离散采样系统的 MTF^[10-13],该思路有望避免离散耦合特性对传递函数计算过程的干扰。

基于传递函数的对比度定义推导了线阵光纤传像束与线阵 CCD 间的耦合对比度 MTF,通过实验发现了若干有别于传统空不变系统的特性^[14]。基于光强(灰度)余弦分布靶标的响应特性,对面阵光纤传像束与面阵 CCD 间的耦合调制传递函数(Coupled-MTF)进行了理论研究,建立了两级离散采样系统的 Coupled-MTF 数学模型,并分析了 Coupled-MTF 的若干特性,为构建成像质量评价模型以及实验验证提供了理论基础。

2 理论推导与计算

面阵光纤传像束工作原理如图 1 所示,成像系统由前端的可见光成像系统、面阵光纤传像束、耦合物镜和面阵 CCD 等构成。

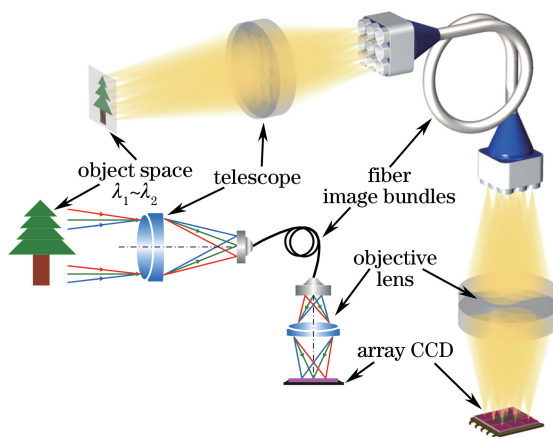


图 1 面阵光纤传像束的工作原理

Fig. 1 Working principle of array fiber image bundles

通过成像物镜将景物目标以一定倍率进行放大并成像至面阵光纤传像束,若不改变面阵光纤传像束的相对孔径,并且光纤芯层直径远大于望远系统的艾里斑半径时,可由耦合物镜将面阵光纤传像束出射的图像耦合成像至面阵 CCD 感光面。面阵光纤传像束的入射窗口位于成像物镜像方焦面,出射窗口位于耦合物镜的物面上,面阵 CCD 感光面则位于耦合物镜像面上。

图 2(a)所示为面阵光纤传像束与面阵 CCD 像元间的理想耦合情况。面阵光纤传像束中单根光纤直径与面阵 CCD 的像元尺寸相同且一对一耦合,系统的成像质量与理论设计状态一致。如图 2(b)所示,实际装调过程会引入像元耦合误差,导致面阵光纤传像束与面阵 CCD 的像元间存在耦合误差,使系统成像质量下降。图 2 中, R 为光纤包层半径, r 为光纤芯层半径, Δi 和 Δj 分别为子午和弧矢方向的像元耦合误差, δ 为灰度余弦分布目标与像元耦合阵列间的初位置偏差。

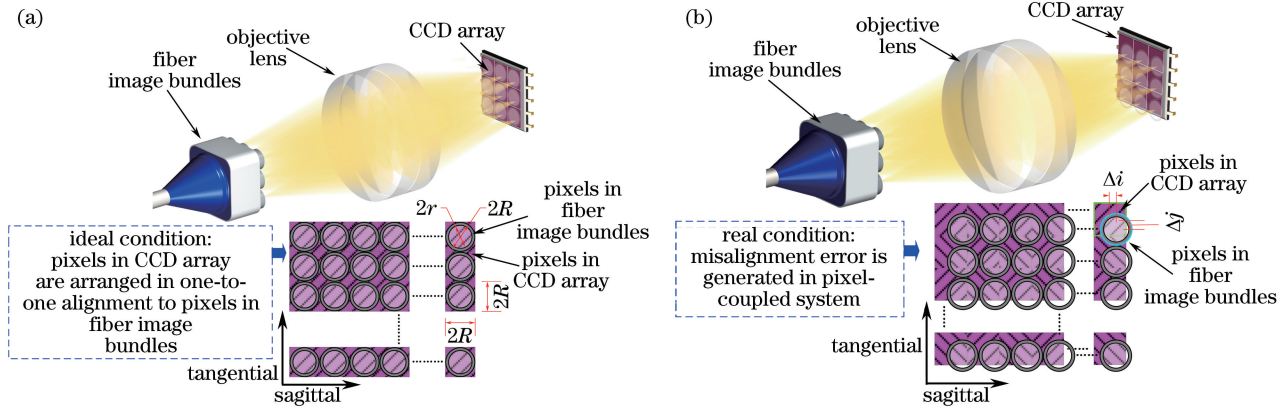


图 2 面阵光纤传像束与面阵 CCD 的像元耦合原理示意图。(a) 理论上像元间一对一耦合状态;
(b) 存在耦合误差的像元耦合状态

Fig. 2 Schematic of pixel coupling principle of array fiber image bundles and array CCD.

(a) One-to-one coupling state of pixels in theory; (b) pixel coupling state with coupled error

为避免空不变假设对傅里叶变换的限制,基于广义空不变假设,并且依据 MTF 的调制度定义,即根据系统对光强度呈余弦分布的输入信号的输出响应分布,定义耦合离散采样系统的 Coupled-MTF,其物理模型如图 3 所示。

光强度呈余弦分布的光学目标(此处忽略目标沿高度和长度方向的维度限制)照射进前端望远成像系统,经面阵光纤传像束和面阵 CCD 的两次离散采样后,由面阵 CCD 像元输出光强度。根据面阵 CCD 各像

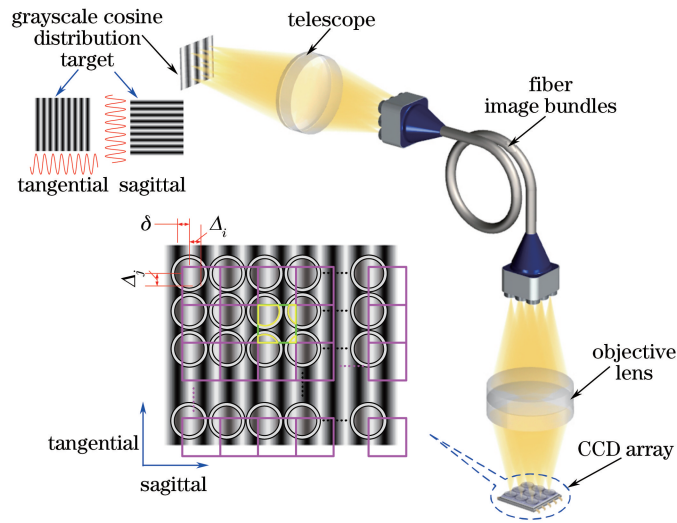


图 3 耦合离散采样系统的 Coupled-MTF 物理模型

Fig. 3 Physical model of Coupled-MTF of coupled discrete sampling system

元输出图像的光强度值及其分布,采用统计平均方法计算输出图像的光强调制度,再依据 MTF 定义,建立系统的 Coupled-MTF 模型。由于光强度呈余弦分布的信号具有方向性,在建立成像系统 Coupled-MTF 模型过程中需要使余弦信号沿相互正交的两个方向分别照射进待测系统,以获得耦合离散采样系统在子午方向和弧矢方向的 MTF 模型。

对模型的简化和数学处理如下。

1) 实际耦合误差存在于三维空间,即存在面阵光纤传像束与面阵 CCD 之间 6 个维度上的失调。但对于离焦误差和 3 个倾斜方向的失调误差,通过传统方法已可控制至亚微米和亚秒量级。这个量级的装调精度对于 1000×1000 个耦合像元的输出图像质量的影响可忽略。对成像质量影响较大的装调误差源自像元在子午和弧矢方向的平移耦合误差。

2) 由于图 1 所示的成像物镜和耦合物镜皆为传统光学器件,假定其各视场的调制传递函数为定值。由于耦合物镜的放大倍率误差可能导致像元缩放并引入其他耦合误差,需要在实际装调过程中精确调整和标定耦合物镜的放大倍率,以确保面阵光纤传像束与面阵 CCD 的像元实现尺寸上的一对一耦合。

3) 激光经光纤长距离传输,其光强分布呈现较强的高斯特性。与光通信领域不同,这里所涉及的面阵光纤传像束仅用于宽谱段(350~750 nm)光束的图像传递。由于宽谱段光束的相干长度远小于单根光纤的直径且光场强度较弱,输入光束本身不存在高斯特性,且面阵光纤传像束的出射窗口距面阵 CCD 像面的几何距离极小,因此由光纤传导引起的出射光束的高斯特性微乎其微^[15]。在计算 MTF 过程中假定:面阵光纤传像束中各单根光纤仅对输入光强分布进行采样,而不改变单根光纤内的光强度分布。

4) 相关文献表明,用于传导激光的面阵光纤传像束间存在较大串扰,若面阵光纤传像束的长度达到 100 m 以上,串扰一般为 $-60 \text{ dB} \sim -10 \text{ dB}$ 。而对于只用于几百毫米内图像传输的面阵光纤传像束,串扰引起的图像调制度的下降小于 1%,且束面内不同区域的串扰率接近定值,在数学推导中用系数 C 代表面阵光纤传像束内的平均串扰率引起的平均调制度下降^[16]。

假设输入信号为光强度呈余弦分布的靶标,且高度方向远大于光纤阵列行方向的几何长度,即照射在线列光纤上的信号分布为

$$I(x) = 1 + C_0(f, \delta) \cos [2\pi f(x + \delta)], \quad (1)$$

式中 f 为输入信号的空间频率, $C_0(f, \delta)$ 为调制度。奈奎斯特频率 $f_N = 1/(4R)$, 则光纤阵列中第 i 行、第 j 列个光纤输出信号的光强度可表示为

$$I'_{i,j}(x) = 2 \int_{x_j-r}^{x_j+r} \{1 + C_0(f, \delta) \cos [2\pi f(x + \delta)]\} [r^2 - (x - x_j)^2]^{\frac{1}{2}} dx = \\ 2 \int_{2jR-r}^{2jR+r} \{1 + C_0(f, \delta) \cos [2\pi f(x + \delta)]\} [r^2 - (x - 2jR)^2]^{\frac{1}{2}} dx. \quad (2)$$

图 4、5 所示为面阵光纤传像束像元与面阵 CCD 像元耦合的简略模型。根据前述有关耦合误差的相关假设,针对这两种情况进行数学模型推导。

如图 4 所示,对于第一种耦合误差,面阵 CCD 与面阵光纤传像束像元的耦合误差仅使单个 CCD 像元接收到来自相邻 3 根光纤像元输出的光信号。考虑光纤芯层与包层的半径差,有

$$\sqrt{(R - \Delta_i)^2 + (R - \Delta_j)^2} \geq r, \quad (3)$$

式中 Δ_i 为弧矢方向的像元耦合误差, Δ_j 为子午方向的像元耦合误差。弓形 AGCB 代表的受光面积为

$$S_{AGCB} = r^2 \arccos \frac{R - \Delta_i}{r} - (R - \Delta_i) \times \sqrt{r^2 - (R - \Delta_i)^2}. \quad (4)$$

弓形 DHEF 代表的受光面积为

$$S_{DHEF} = r^2 \arccos \frac{R - \Delta_j}{r} - (R - \Delta_j) \times \sqrt{r^2 - (R - \Delta_j)^2}. \quad (5)$$

相邻像元输出信号的有效受光面积为

$$S_{i,j+1} = r^2 \arccos \frac{R - \Delta_i}{r} - (R - \Delta_i) \times \sqrt{r^2 - (R - \Delta_i)^2}, \quad (6)$$

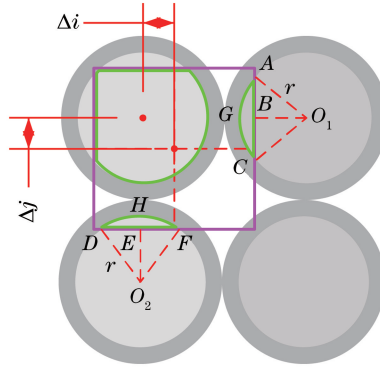


图 4 第一种像元耦合误差示意图

Fig. 4 Diagram of the first kind of pixel coupled error

$$S_{i+1,j} = r^2 \arccos \frac{R - \Delta_j}{r} - (R - \Delta_j) \times \sqrt{r^2 - (R - \Delta_j)^2}, \quad (7)$$

$$S_{i,j} = \pi r^2 - S_{i+1,j} - S_{i,j+1}. \quad (8)$$

针对存在第一种耦合误差的情况,面阵 CCD 中第 i 行、第 j 列个像元的输出信号强度表达式为

$$I''_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{\pi r^2} I'_{i,j} + \frac{S_{i+1,j}}{\pi r^2} I'_{i+1,j} + \frac{S_{i,j+1}}{\pi r^2} I'_{i,j+1}, \quad (9)$$

式中 $I'_{i,j}$ 为第 i 行、第 j 列个光纤的输出光强, $I'_{i+1,j}$ 为第 $i+1$ 行、第 j 列个光纤的输出光强, $I'_{i,j+1}$ 为第 i 行、第 $j+1$ 列个光纤的输出光强。

图 5 所示为第二种耦合误差,面阵 CCD 与面阵光纤传像束的像元耦合误差使单个 CCD 像元接收来自相邻 4 个光纤传像束像元的出射光信号。同上,面阵光纤传像束中相邻 4 个光纤的受光面积存在的关系为

$$S_{i,j} = \frac{[\sqrt{r^2 - (R - \Delta_i)^2} + R - \Delta_j] (R - \Delta_i)}{2} + \frac{[\sqrt{r^2 - (R - \Delta_j)^2} + R - \Delta_i] (R - \Delta_j)}{2} + \frac{r^2}{2} \left(\frac{3\pi}{2} - \arccos \frac{R - \Delta_j}{r} - \arccos \frac{R - \Delta_i}{r} \right), \quad (10)$$

$$S_{i,j+1} = \sqrt{r^2 - (R - \Delta_j)^2} \times (R - \Delta_j) + r^2 \left(\pi - \arccos \frac{R - \Delta_j}{r} \right) - S_{i,j}, \quad (11)$$

$$S_{i+1,j} = \sqrt{r^2 - (R - \Delta_i)^2} \times (R - \Delta_i) + r^2 \left(\pi - \arccos \frac{R - \Delta_i}{r} \right) - S_{i,j}, \quad (12)$$

$$S_{i+1,j+1} = \pi r^2 - S_{i,j} - S_{i,j+1} - S_{i+1,j}. \quad (13)$$

针对第二种耦合误差,面阵 CCD 中第 i 行、第 j 列个像元输出信号强度的表达式为

$$I''_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{\pi r^2} I'_{i,j} + \frac{S_{i+1,j}}{\pi r^2} I'_{i+1,j} + \frac{S_{i,j+1}}{\pi r^2} I'_{i,j+1} + \frac{S_{i+1,j+1}}{\pi r^2} I'_{i+1,j+1}. \quad (14)$$

根据 MTF 的光强调制度定义,当输入光学信号的光强度呈余弦分布时,系统的 MTF 等于出射信号光强调制度与入射信号光强调制度之比,即通过调制度之比反映两级耦合离散系统对于输入光强呈余弦分布信号的响应特性。根据(1)式可得到入射光信号的光强调制度为 $C_0(f)$ 。根据(7)、(12)式,可得到不同耦合误差下的输出光信号的光强分布,再根据调制度定义可得到出射信号的光强调制度。根据 MTF 的定义和(1)、(2)、(7)和(12)式,可获得面阵光纤传像束与面阵 CCD 构成的耦合离散采样系统对于光强呈余弦分布的信号的响应函数,即系统的 Coupled-MTF 的数学模型为

$$f_{\text{Coupled-MT}}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta) = \frac{Cf_{\text{MT}_T}(f) f_{\text{MT}_O}(f) \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I''_{\text{maxi},j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I''_{\text{mini},j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta) \right]}{\left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I''_{\text{maxi},j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I''_{\text{mini},j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta) \right]} C_0(f), \quad (15)$$

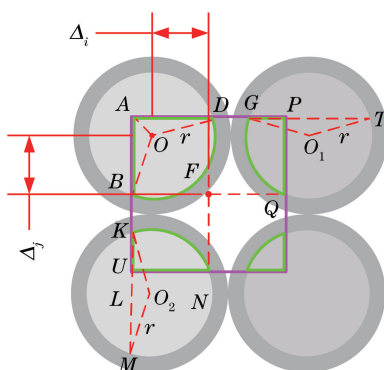


图 5 第二种像元耦合误差示意图

Fig. 5 Diagram of the second kind of pixel coupling error

式中 C 为平均串扰率, $f_{MT_T}(f)$ 和 $f_{MT_O}(f)$ 分别为前置望远镜和耦合物镜的 MTF, M 为面阵 CCD 像元中输出信号大于平均值的像元个数, N 为面阵 CCD 像元中输出信号小于平均值的像元个数, $I''_{maxi,j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta)$ 、 $I''_{mini,j}(f, \Delta_i, \Delta_j, \delta)$ 分别为第 i 行、第 j 列个像元输出信号强度的最大值和最小值。

根据(13)式,对于耦合离散采样成像系统,在给定空间频率下,系统的 MTF 不再为固定值,而与面阵光纤传像束与面阵 CCD 像元之间沿两个方向的耦合误差有关,并且与阵列中所含光纤数总数、余弦信号和光纤阵列初位置偏差均相关,通过数学仿真可观察其中规律。

3 仿真与讨论

3.1 Coupled-MTF 收敛性

若采用光强度呈余弦分布的光学目标作为输入,受光学准直系统、成像系统间焦距及其比值不确定度、目标自身模拟精度等限制,难以准确模拟空间频率为奈奎斯特频率或其分频的余弦靶标,因此需要首先在奈奎斯特频率附近研究耦合 Coupled-MTF 的收敛性。

假设光纤包层半径 $R=3 \mu\text{m}$,芯层半径 $r=2.5 \mu\text{m}$,依据前述的光纤传像束像元与 CCD 像元尺寸匹配原则,对应的面阵 CCD 中单个像元尺寸为 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,光纤个数为 1024×1024 ,初位置偏差为 $15\%R$,沿 x 方向的像元耦合误差为 $25\%R$,沿 y 方向的像元耦合误差为 $55\%R$,串扰率为定值,输入余弦目标的空间频率为奈奎斯特频率的 99% ,即 $f=0.99f_N$ 。如图 6 所示,根据(13)式可以获得 Coupled-MTF 随阵列中像元数振荡收敛的仿真结果。

面阵光纤传像束与面阵 CCD 参数及其耦合误差与第一种情况相同时,当输入余弦目标的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.5% ,随着阵列中像元数的增加,Coupled-MTF 在子午方向和弧矢方向的振荡收敛情

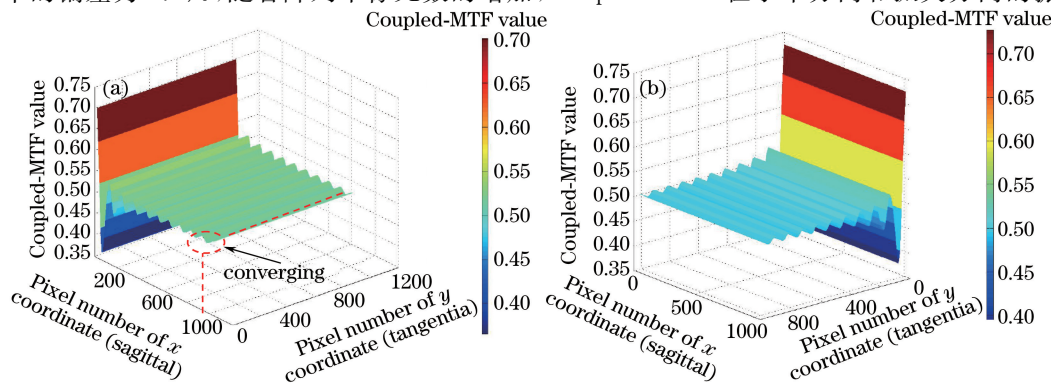


图 6 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 1% 时 Coupled-MTF 随像元数变化的振荡收敛情况仿真。

(a) 弧矢方向; (b) 子午方向

Fig. 6 Simulation of oscillation convergence of Coupled-MTF with number of pixels when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 1% . (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

况仿真结果如图 7 所示。

面阵光纤传像束与面阵 CCD 参数及其耦合误差与第一种情况相同时,当输入余弦目标的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.2%,随着阵列中像元数的增加,Coupled-MTF 在子午方向和弧失方向的振荡收敛情况仿真结果如图 8 所示。

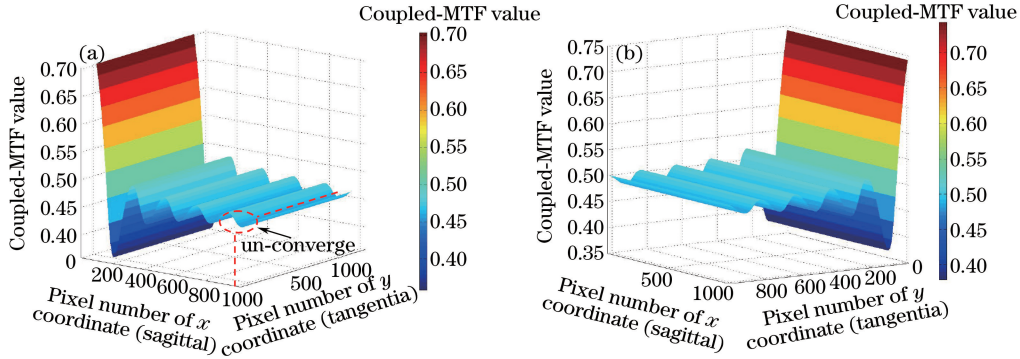


图 7 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.5% 时 Coupled-MTF 随像元数变化的振荡收敛情况仿真。

(a) 弧失方向; (b) 子午方向

Fig. 7 Simulation of oscillation convergence of Coupled-MTF with number of pixels when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 0.5%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

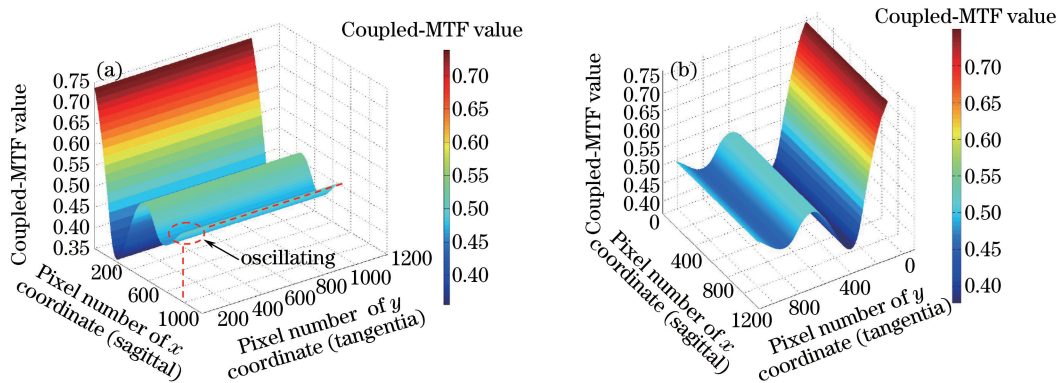


图 8 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.2% 时 Coupled-MTF 随像元数变化的振荡收敛情况仿真。

(a) 弧失方向; (b) 子午方向

Fig. 8 Simulation of oscillation convergence of coupled-MTF with number of pixels when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 0.2%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

面阵光纤传像束与面阵 CCD 参数及其耦合误差与第一种情况相同时,当输入余弦目标的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.1%,随着阵列中像元数的增加,Coupled-MTF 在子午方向和弧失方向的振荡收敛情况仿真结果如图 9 所示。

上述仿真结果表明,面阵 CCD 与面阵光纤传像束构成的耦合离散采样成像系统在给定空间频率时,子午与弧失方向的 MTF 值不同,MTF 值与子午方向、弧失方向的像元耦合误差有关。

图 6~9 所示的仿真输入条件中,输入信号的空间频率与奈奎斯特频率的偏差从 1% 逐渐缩小到 0.1%,而 Coupled-MTF 在弧失和子午方向均显现出收敛速度逐渐减慢的趋势。以图 6 所示的仿真结果为例,当阵列中含有 1024×1024 个像元时,Coupled-MTF 的振荡幅值约为 0.005。如图 7 所示,当阵列中含有 1024×1024 个像元时,Coupled-MTF 的振荡幅值约为 0.03。如图 9 所示,对应阵列中含有 1024×1024 个像元时,Coupled-MTF 的振荡幅值约为 0.2,而只有当像元中包含的光纤数量超过 10^8 时,Coupled-MTF 的振荡幅值才会减小至约 0.01。结果表明,无论子午方向还是弧失方向,当同时存在像元间耦合误差和像元间初位置偏差,并且输入余弦信号的频率与奈奎斯特频率存在微小偏差时,Coupled-MTF 与系统所含像元数量相关,为不固定值。当耦合采样系统中所含像元总数增加至一定数量后,Coupled-MTF 才振荡收敛为定值。振荡收敛速度与输入余弦信号空间频率与奈奎斯特频率的偏差有关:偏差越小,Coupled-MTF 振荡收敛速度越慢,

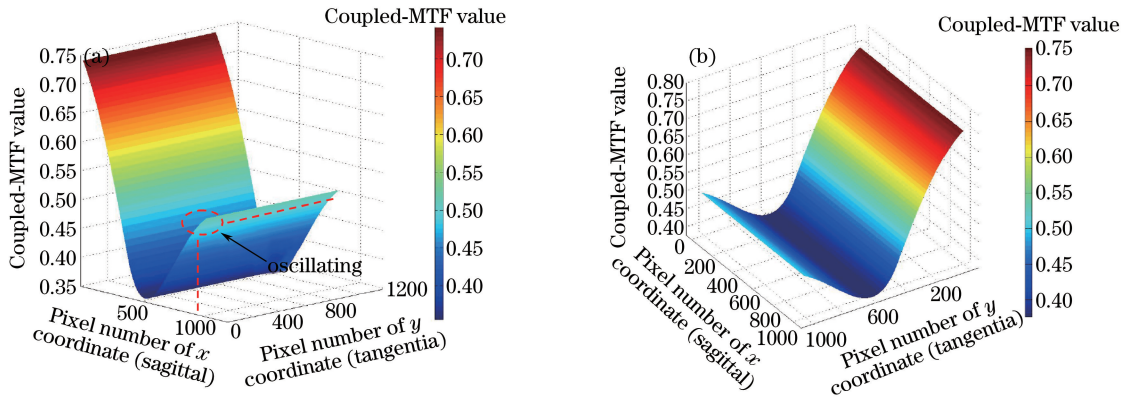


图 9 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.1% 时 Coupled-MTF 随像元数变化的振荡收敛情况仿真。

(a) 弧失方向; (b) 子午方向

Fig. 9 Simulation of oscillation convergence of coupled-MTF with number of pixels when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 0.1%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

但总的振荡幅值一致。子午方向与弧失方向的像元耦合误差不同,导致 Coupled-MTF 在子午方向和弧失方向最终的收敛目标值不同,振荡的起始值也有所不同,但随着像元数的增加,耦合离散系统的 Coupled-MTF 在子午方向和弧失方向振荡收敛的趋势相同。

3.2 Coupled-MTF 与像元耦合误差

受装调精度的限制,面阵光纤传像束与面阵 CCD 的像元间总会存在平移方向的耦合误差。利用(13)式,研究了耦合系统成像质量与像元耦合误差间的作用规律。

1) 假设光纤包层半径 $R=3\ \mu\text{m}$,芯层半径 $r=2.5\ \mu\text{m}$,光纤个数为 1024×1024 ,初位置偏差为 $25\%R$,沿两个方向的像元耦合误差由 0 变化至 $2R$,输入余弦目标的空间频率为奈奎斯特频率的 99.75% ,即 $f=0.9975f_N$ 。根据(13)式可获得 Coupled-MTF 在弧失方向和子午方向随像元耦合误差变化的仿真结果,如图 10 所示。

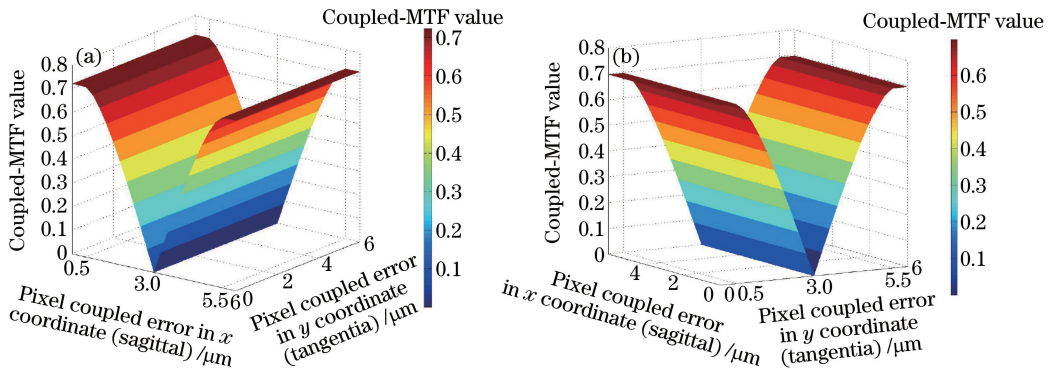


图 10 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 0.25% 时 Coupled-MTF 随像元耦合误差的变化情况仿真。

(a) 弧失方向; (b) 子午方向

Fig. 10 Variation in Coupled-MTF with pixel coupled error when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 0.25%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

2) 当面阵光纤传像束与面阵 CCD 参数及初位置偏差与第一种情况相同时,输入余弦目标的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 1% ,Coupled-MTF 在弧失和子午方向随像元耦合误差变化的仿真结果如图 11 所示。

3) 当面阵光纤传像束与面阵 CCD 参数及初位置偏差与第一种情况相同时,输入余弦目标的空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 2% 时,Coupled-MTF 在弧失和子午方向随像元耦合误差变化的仿真结果如图 12 所示。

仿真结果表明,若输入余弦信号的空间频率与奈奎斯特频率存在微小偏差,则耦合采样系统的 Coupled-MTF 在弧失方向和子午方向均随像元耦合误差呈周期性振荡。理论上振荡周期为光纤包层半径的 2 倍,振

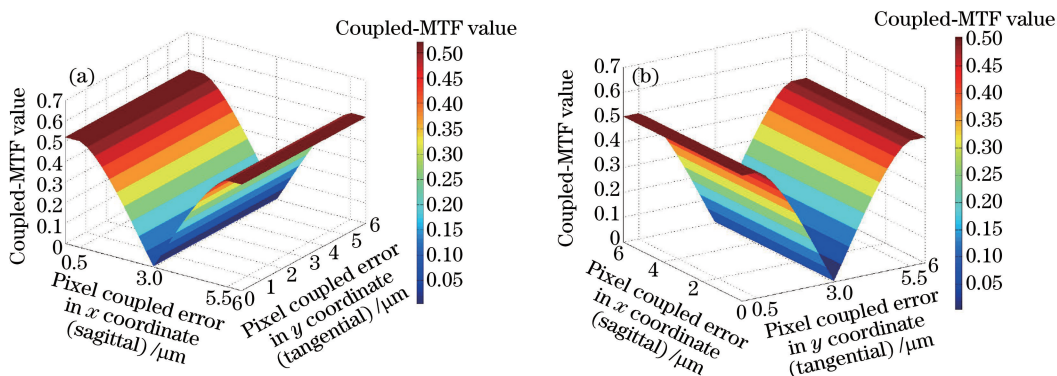


图 11 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 1% 时 Coupled-MTF 随像元耦合误差的变化情况。
(a) 弧矢方向; (b) 子午方向

Fig. 11 Variation in coupled-MTF with pixel coupled error when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 1%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

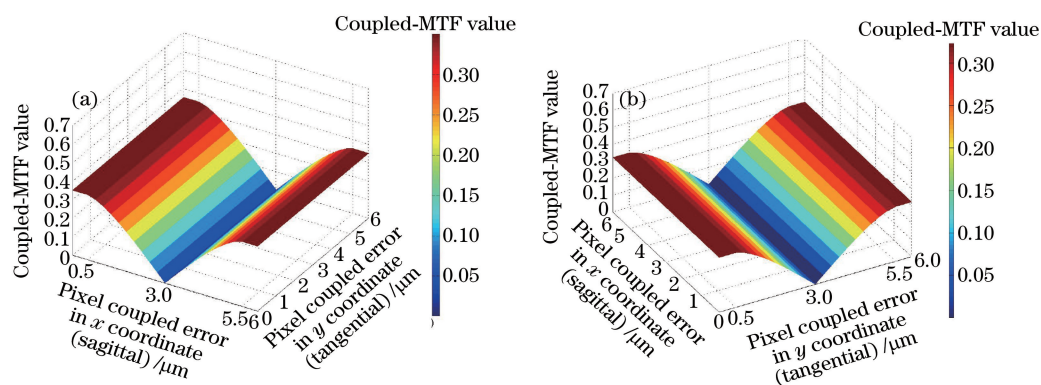


图 12 余弦目标空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 2% 时 Coupled-MTF 随像元耦合误差的变化情况。
(a) 弧矢方向; (b) 子午方向

Fig. 12 Variation in coupled-MTF with pixel coupled error when deviation between cosine target spatial frequency and Nyquist frequency is 2%. (a) Sagittal direction; (b) tangential direction

荡幅值与上述频率误差的大小相关。输入信号频率与奈奎斯特频率偏差越小, Coupled-MTF 随像元耦合误差的振荡幅值越大。当频率偏差 Δf 一定时, Coupled-MTF 的最小值出现在像元耦合误差与光纤包层半径相等时, 若完全忽略串扰的影响, 该值接近为 0。耦合离散采样系统随像元耦合误差的周期振荡特性在子午、弧矢方向均存在。

如图 13 所示, 在耦合系统的子午(或弧矢)方向, Coupled-MTF 随该方向的像元耦合误差均按相同周期振荡, 振荡的幅值与输入余弦信号的空间频率与奈奎斯特频率的偏差成正相关。

仿真结果表明, 若采用余弦信号并根据传递函数的光强调制度定义计算由面阵光纤传像束与面阵 CCD

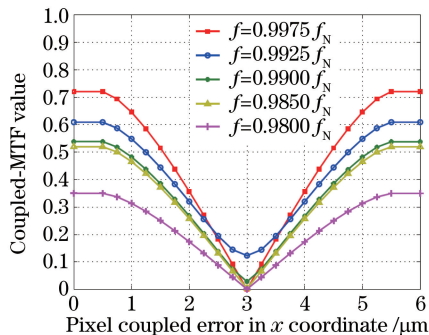


图 13 Coupled-MTF 值随像元耦合误差的周期振荡仿真

Fig. 13 Periodic oscillation simulation of coupled-MTF value with pixel coupled error

构成的耦合离散采样系统的 MTF,其在子午和弧矢方向的像元耦合误差的不同会导致两个方向对应的传递函数值不同。当光强度呈余弦分布的输入信号的空间频率与系统奈奎斯特频率间存在微小偏差时,系统的 MTF 随像元数量的增加振荡收敛,随像元耦合误差周期性振荡。

4 结 论

将面阵光纤传像束加入传统光电成像系统,可使仪器具有柔性,提高了光路布置灵活性和设计余度,缩小了仪器体积和重量,并且改善了成像性能。伴随成像面阵光纤传像束制作工艺的改进,包含面阵光纤传像束的新型光电成像系统在诸多领域具有应用潜力。

受两级离散采样效应所限,基于傅里叶变换和级联相乘理论的 MTF 模型显现出一定的局限性。基于 MTF 的光强调制度定义以及面阵光纤传像束的实际工程应用特点,对数学模型进行了必要的限定,通过推导灰度余弦信号经两级离散采样系统传递后的输出信号光强度分布,建立了 Coupled-MTF 的数学模型。数学仿真和分析发现:

1) 若面阵光纤传像束像元与面阵 CCD 像元间存在耦合误差,当输入信号空间频率与奈奎斯特频率存在微小偏差时,随阵列中所含像元数的增加,Coupled-MTF 振荡收敛为固定值。Coupled-MTF 的收敛速度与偏差大小成逆相关,当频率偏差为 1%,对于包含 1000×1000 个光纤的耦合离散成像系统,其 MTF 接近收敛为固定值。输入目标的空间频率与奈奎斯特频率偏差越小,Coupled-MTF 收敛速度越慢,只有当阵列中包含大量像元时,Coupled-MTF 才收敛为定值。

2) Coupled-MTF 的上述收敛特性在弧矢和子午方向同时显现,但 Coupled-MTF 最终的收敛目标值与像元耦合误差有关。若两级耦合离散采样系统在子午和弧矢方向的像元耦合误差有所差异,将导致其在子午方向和弧矢方向对应奈奎斯特频率及其分频的传递函数值明显不同。

3) Coupled-MTF 随像元耦合误差周期振荡,振荡的空间频率等于光纤包层直径。Coupled-MTF 的振荡幅值与输入信号空间频率与奈奎斯特频率的偏差大小成正相关。当输入信号空间频率与奈奎斯特频率的偏差为 1%,像元耦合误差导致的 Coupled-MTF 振荡幅值接近 0.5。上述规律在像元阵列的子午方向和弧矢方向同时存在,但 Coupled-MTF 在子午和弧矢方向的振荡频率、幅值则保持一致。

4) 对于空不变系统或仅含有 CCD 的光电成像系统,其在奈奎斯特频域内给定空间频率处的 MTF 为确定值。研究人员可对系统的本征参数进行选择并对光电仪器的成像质量进行分析和预测。当存在像元耦合误差时,Coupled-MTF 在子午和弧矢方向的数值与系统中所包含的耦合像元总数、像元耦合误差及其与奈奎斯特整数分频之间的偏差有关。对于此类系统,难以单纯根据 Coupled-MTF 模型预测系统成像性能。单纯的 Coupled-MTF 模型难以全面解释耦合误差、空间频率与两级耦合离散采样成像系统 MTF 间的作用规律,仍需利用统计平均的思路进一步对多像元耦合系统的成像质量模型进行推导和完善,才可准确指导系统设计和安装调试。

下一步将尝试构建实验光路,以全面验证本文的理论分析和数学仿真。

参 考 文 献

- [1] Zhou Dechun, 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.
- [2] Inoue S, Katagiri T, Matsuura Y. Fiber-optic direct Raman imaging system based on a hollow-core fiber bundle[C]. SPIE, 2015, 9317: 93170V.
- [3] Olivas S J, Arianpour A, Stamenov I, *et al.* Image processing for cameras with fiber bundle image relay[J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 1124-1137.
- [4] Fletcher-Holmes W D, Harvey A R. Snapshot foveal hyperspectral imager[C]. SPIE, 2002, 4816: 407-414.
- [5] Chiarulli D M, Levitan S P, Derr P, *et al.* Demonstration of a multichannel optical interconnection by use of imaging fiber bundles butt coupled to optoelectronic circuits[J]. Applied Optics, 2000, 39(5): 698-703.
- [6] Seki A, Iwai K, Katagiri T, *et al.* Photo acoustic imaging by using a bundle of thin hollow-optical fibers[C]. SPIE,

2016, 9702: 970202.

- [7] Ford H D, Tatam R P. Characterization of optical fiber imaging bundles for swept-source optical coherence tomography [J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 627-640.
- [8] Carter T. Sampled MTF of fused fiber optic components and bonded assemblies[C]. SPIE, 2013, 8735: 873507.
- [9] Schacham S E, Marhic M E, Kot C. Coupling of rigid to flexible imaging multifibers[J]. Applied Optics, 1978, 17(23): 3818-3821.
- [10] Drougard R. Optical transfer properties of fiber bundles[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(7): 907-914.
- [11] Huang L, Österberg U. Measurement of cross talk in order-packed image fiber bundles[C]. SPIE, 1995, 2536: 480-488.
- [12] Ikhlef A, Skowronek M. Application of a plastic scintillating fiber array for low-energy X-ray imaging [J]. Applied Optics, 1998, 37(34): 8081-8084.
- [13] Han J H, Lee J H, Kang J U. Pixelation effect removal from fiber bundle probe based optical coherence tomography imaging[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7427-7439.
- [14] He X, Xiang Y. Study on a method of evaluating the alignment of pixels between fiber-optic image bundles and detector arrays[J]. Applied Optics, 2011, 50(25): E189-E192.
- [15] Hong Minfang, Shen Jianqi, Zhang Qiuchang, *et al.* Propagation of Gaussian beam through planar interface [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702005.
洪敏芳, 沈建琪, 张秋长, 等. 高斯光束垂直入射到不同折射率介质中的传播规律 [J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702005.
- [16] Zang Liuqin, Zhang Zhenxi, Miao Baogang, *et al.* Multicolor fluorescence detection in the multiplex quantitative PCR system and spectra crosstalk correction method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0117002.
臧留琴, 张镇西, 苗宝刚, 等. 多重定量 PCR 系统中多色荧光检测和光谱串扰校正方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0117002.