

基于调制传递函数的光学低通滤波器 评价模型与实验研究*

戚巽骏^{1)†} 林 斌¹⁾ 曹向群¹⁾ 陈钰清¹⁾

1) 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

2) 安徽师范大学物理与电子信息学院, 芜湖 241000)

(2007 年 7 月 3 日收到, 2007 年 8 月 29 日收到修改稿)

为了量化评价光学低通滤波器(optical low pass filter, OLPF)利用调制传递函数(modulation transfer function, MTF)建立了一个包含 OLPF 的二维数字光学成像系统模型, 并以此模型为基础构建了 OLPF 的评价函数. 应用该评价函数, 计算三种典型 OLPF 的滤波特性, 计算结果表明随着理想光学系统空间截止频率的增大, 三种 OLPF 的滤波性能均有先微弱增强, 后迅速减弱的趋势. 当光学系统 F 数大于 4.4 时, 采用嵌入“两层四点”式 OLPF 的数字成像系统的低通滤波效果优于另外两种, 而当光学系统 F 数小于 4.4 时, 采用嵌入“三层八点”式 OLPF 的数字成像系统效果最好. 在光学系统 F 数为 2.8 时, “三层八点”式的 OLPF 相对于“两层四点”式和“三层四点”式的滤波性能分别改善了 28.3% 和 37.5%. 最后, 三种 OLPF 的成像滤波实验表明, “两层四点”式和“三层四点”式的滤波图像仍有部分莫尔条纹和伪彩色残余, 而“三层八点”式的滤波图像的莫尔条纹和伪彩色均抑制得较好, 实验结果与理论计算相符合.

关键词: 光学低通滤波器, 调制传递函数, 评价函数, 空间频率

PACC: 0768, 0760, 4280

1. 引 言

近几年来, 数字图像传感器在各领域得到了大量的应用. 由于 CCD 或者 CMOS 等数字图像传感器的像素是离散的, 根据奈奎斯特抽样定理, 其所能分辨的最高空间频率是它的空间采样频率的 1/2, 即奈奎斯特极限频率. 若图像的空间频率高于奈奎斯特极限频率, 在传感器上高频部分将被反射到基本频带, 造成图像周期频谱交叠, 即混频现象, 致使成像质量降低^[1, 2]. 因此, 运用光学低通滤波器(optical low pass filter, OLPF)成为消除混频现象的有效手段^[3-5].

光学传递函数是用亮度以空间频率(单位长度上的周期数)作正弦变化的线状物体的成像状态来说明光学系统的性能. 经过 Wittenstein 等人的推广, 光学传递函数已经广泛地应用于离散抽样成像系统中^[1]. 光学传递函数的模是调制传递函数(modulation transfer function, MTF), 也叫对比传递函数, 现在已经

成为评价成像系统的一个定量描述参数. 目前, OLPF 主要有双折射低通滤波器(birefringent low-pass filter, BLF)和光栅低通滤波器(grating optical low-pass filter, GOLP)两类, 而这两类光学低通滤波器中, 又有多种不同结构, 因此, 客观量化地评价这些 OLPF 的滤波性能具有重要意义. 此外, 传统设计和评价 OLPF 的低通性能仅仅考虑 OLPF 与数字图像传感器(CCD 或者 CMOS)的匹配, 而忽略了与光学系统的匹配, 即对于一个既定的光学系统, 选取何种结构和参数的 OLPF 能达到最佳滤波效果从未进行过研究. 本文将利用 MTF 建立一个包含 OLPF 的二维数字光学成像系统模型, 并构建相应的评价函数. 利用此评价函数, 可以评价多种类各种结构 OLPF 和优化特定结构 OLPF 具体参数等. 为了验证该模型和评价函数的正确性, 将三种典型结构的 OLPF 嵌入到整个数字成像系统中, 计算得到三种 OLPF 与整个成像系统的滤波性能并加以讨论分析比较. 最后设计了成像滤波实验来验证模型和计算结果的正确性.

* 国家高技术研究发展计划(863)批准号 2004AA001019 资助的课题.

† E-mail: xunjunqi@163.com

2. 含 OLPF 光学系统模型

在实际数字成像使用中,OLPF 总是处在一定的光学系统中,因此假设被摄景物经过一定圆形孔径的光学系统后,透过 OLPF,成像在数字图像传感器(比如 CCD 或者 CMOS)上,若被摄物是非相干的,对光学系统的传递函数进行一级近似,有

$$\text{MTF}_{\text{lens}} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{f_{\text{max}}} \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, & f_x^2 + f_y^2 \leq f_{\text{max}}^2 \text{ 即 } S \text{ 区域,} \\ 0, & \text{其他区域,} \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_x 和 f_y 分别表示 x 方向和 y 方向的空间频率, $f_{\text{max}} \approx 1/\lambda F$, λ 为波长, F 表示该光学系统的 F 数,即 f_{max} 取决于光学系统和入射波长^[6].

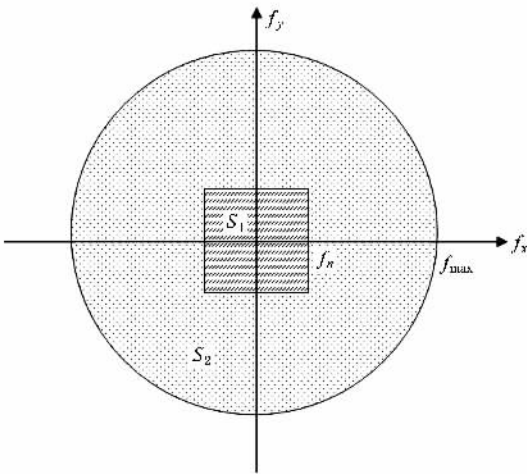


图1 比奈斯特极限频率大和小的空间频率区域

对于一个理想的光学低通滤波器,当空间频率小于奈奎斯特极限频率,即图1中的 S_1 区域时,其光学调制传递函数为1,当空间频率大于奈奎斯特极限频率,即图1中的 S_2 区域时,光学调制传递函数为0,即

$$\text{MTF}_{\text{ideal}} = \begin{cases} 1, & |f_x| \leq f_{xn} \cap |f_y| \leq f_{yn} \text{ 即 } S_1 \text{ 区域,} \\ 0, & \text{其他区域,} \end{cases} \quad (2)$$

式中 f_{xn} 和 f_{yn} 分别表示 x 和 y 方向数字图像传感器的奈奎斯特极限频率,取决于数字图像传感器像素单元的大小.值得注意的是在上述(1)和(2)两个式中 f_x 和 f_y 中的负值不是代表空间频率的负值,而是代表和指定的正方向相反.

可以得到实际的滤波器和理想滤波器差距的评价函数为

$$\Delta = \iint_S [\text{MTF}_{\text{ideal}}(f_x, f_y) - \text{MTF}_{\text{lens}}(f_x, f_y) \times \text{MTF}_{\text{olpf}}(f_x, f_y)]^2 df_x df_y, \quad (3)$$

Δ 值大小表明了实际的 OLPF 与理想的 OLPF 的差距, Δ 值越小,则 OLPF 越接近理想的 OLPF,即其光学低通特性越好.

3. 三种典型结构 OLPF

目前二维 OLPF 有多种不同结构,从中挑选典型的三种结构分别描述如下:第一种由两片双折射晶体平板构成,每块晶体平板光轴与其表面成 45° ,两块晶体平板光轴在平面投影分别和水平方向成 0° 和 45° ,当一点光源投射在其表面时,有四个构成平行四边形的点光源出射,因此,称该结构为“两层四点”式结构,如图 2(a);第二种由两片双折射晶体平板和一块位相补偿板构成,两块晶体平板的光轴在平面上投影分别和水平方向成 0° 和 90° ,位相补偿板的光轴在平面上投影和水平方向成 45° ,当一点光源投射在其表面时,有四个构成正方形的点光源出射,因此,称该结构为“三层四点”式结构,如图 2(b);第三种由三片双折射晶体平板构成,三块晶体平板光轴在平面上投影分别和水平方向成 0° , 45° 和 90° 的夹角,当一点光源投射在其表面时,有八个点光源出射,因此,称该结构为“三层八点”式结构,如图 2(c)^[7-13].

4. 三种典型结构 OLPF 的 MTF

首先计算一维 OLPF 的 MTF,再得到不同结构 OLPF 的 MTF 表达式.如图 3 所示,当一束自然光垂直入射到一块双折射平板上,被分成了 o 光和 e 光,因此单片双折射平板的脉冲响应为

$$h(x, y) = \frac{1}{2} [\delta(x, y) + \delta(x + d\cos\theta, y + d\sin\theta)], \quad (4)$$

式中 (x, y) 为点光源入射的坐标, d 为 o 光和 e 光分开的距离, θ 为平面投影上 o 光和 e 光连线与水平方向的夹角^[6].

对单片双折射平板的脉冲响应(4)式进行傅里叶变换并归一化可得到其光学传递函数

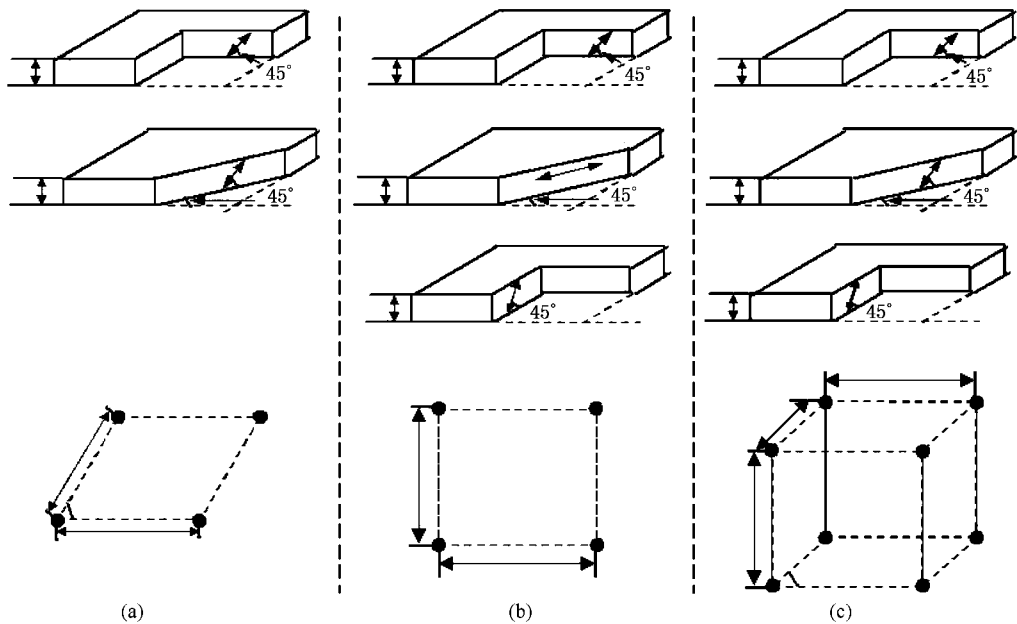


图2 三种典型结构的 OLPF 结构及其点阵图 (a) 两层四点 '式 (b) 三层四点 '式 (c) 三层八点 '式

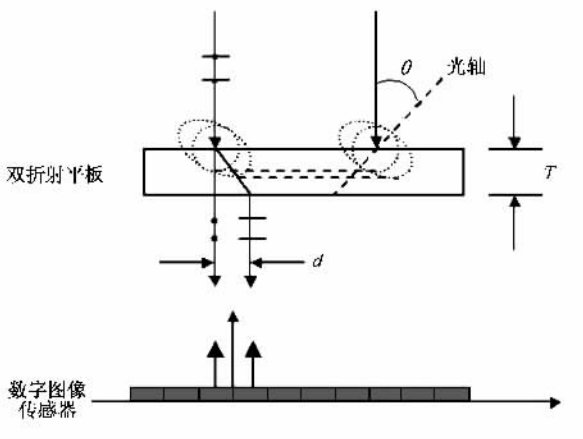


图3 光线正入射时的双折射

$$\begin{aligned} \alpha(f_x, f_y) = & \iint \frac{1}{2} [\delta(x-y) + \delta(x+d\cos\theta-y+dsin\theta)] \\ & \times \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy, \end{aligned} \quad (5)$$

则调制传递函数为

$$MTF = |\cos\pi(f_x d \cos\theta + f_y d \sin\theta)|, \quad (6)$$

(6)式即单片双折射平板的 MTF 表达式。

根据不同 OLPF 的结构, θ 取不同的值, 将三片平板的 MTF 相叠加, 很容易得到三种不同结构的 OLPF 的 MTF 分别为

$$MTF_1 = |\cos(\pi f_x d_1) \cos[\sqrt{2}/2\pi(f_x d_2 + f_y d_2)]| \quad (7)$$

$$MTF_2 = |\cos(\pi f_x d_1) \cos(\pi f_y d_3)|, \quad (8)$$

$$MTF_3 = |\cos(\pi f_x d_1) \cos[\sqrt{2}/2\pi(f_x d_2 + f_y d_2)]|$$

$$\times |\cos(\pi f_y d_3)|. \quad (9)$$

5. 计算及讨论

分别将上述三种结构的 OLPF 的 MTF 表达式代入(3)式, 可以得到三者与理想的 OLPF 的差值 Δ 。

针对 OmniVision 公司的 9625CMOS, 其像素大小 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$, 有效像素 130 万, 设计了上述三种不同结构的 OLPF, 得到三种结构参数如表 1 所示。

理想光学系统的空间截止频率 $f_{\text{max}} = \frac{1}{\lambda F}$, λ 是波长, 取可见光的中心波长即 550 nm , F 为理想光学系统的 F 数, F 数的变化范围为 1.8 到 25, 因此, 理想光学系统的空间截止频率为 72.7 lp/mm 到 1010 lp/mm 。

表 1 三种典型 OLPF 结构的结构参数 (单位: mm)

	“两层四点”式	“三层四点”式	“三片八点”式
第一片厚度	0.88	0.88	0.88
第二片厚度	0.88	0.90	0.62
第三片厚度	//	0.88	0.88

由图 4 可见, 当理想光学系统的空间截止频率小于 410 lp/mm 时, “两层四点”式的 OLPF 的低通性能较其余两种结构好, 即对于 F 数大于 4.4 的光学系统, 采用“两层四点”式的 OLPF, 整个数字成像系统能取得较好的滤波效果; 当理想光学系统的空间

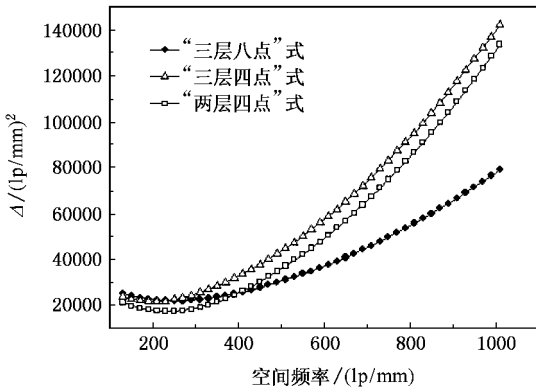


图4 三种典型结构 OLPF 的评价函数值与理想光学系统截止频率关系

截止频率大于 410 lp/mm 时,“三层八点”式的 OLPF 的低通滤波性能较其余两种结构有很大的提升,即对于 F 数小于 4.4 的数字成像光学系统,应采用“三层八点”式的 OLPF.随着理想光学系统的空间截止频率的增高,这三种结构的低通滤波器的性能有先微弱增强,后迅速减弱的趋势.“两层四点”、“三层四点”和“三层八点”式 OLPF 分别在理想光学系统空间截止频率为 225 lp/mm, 210 lp/mm 和 270 lp/mm 时滤波性能最好.如果一个光学系统的 F 数为 2.8,即其理想空间截止频率为 649 lp/mm 时,则根据计算结果,可以看到,“三层八点”式的 OLPF 相对于“两层四点”式和“三层四点”式的 OLPF 的 Δ 值分别减小了 28.3% 和 37.5%,即滤波性能分别改善了 28.3% 和 37.5%.

6. 实 验

为了验证上述理论,构建实验平台如图 5 所示.其中,波带片作为目标物,放置在成像系统前 50 m 处,成像系统采用 BOSMA 2000130 望远镜,其镜头 F 数约为 2.8,电子目镜采用 OmniVision 公司的 9625CMOS 芯片组的电子目镜,最后经过 USB 接口输入计算机.测试用的三种不同结构 OLPF 分别被嵌入在成像系统和 CMOS 之间.

测试结果如图 6 所示,其中左边为测试系统嵌入各种不同结构 OLPF 的波带片整体效果图,而右图是对应的左图中黑色圆圈部分的放大图.

由图 6 的整体效果图可以发现,当没有嵌入 OLPF 时,图像的任意方向莫尔条纹和伪彩色现象明显,图像质量严重被破坏;而嵌了三种不同结构的

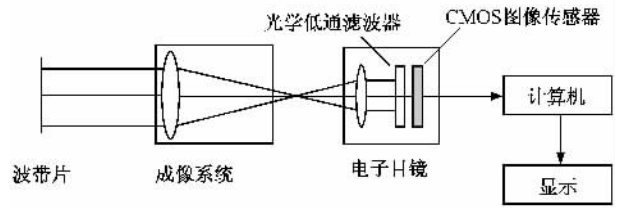


图5 空间频率测试系统

OLPF 后,对图像的莫尔条纹和伪彩色均有比较明显的抑制.其中“两层四点”式的滤波图像具有较明显的水平和竖直方向滤波不均衡性,水平方向滤波效果优于竖直方向的滤波效果,这是由于水平方向,两块双折射平板均有滤波作用,而竖直方向仅有第二块双折射平板有滤波作用;“三层四点”式的滤波图像则水平和竖直方向的滤波较均衡,但是,由于在水平和竖直方向都只有一片水晶平板起滤波作用,因此在水平和竖直方向均有少量莫尔条纹和伪彩色残余;“三层八点”式的滤波图像在水平和竖直方向均有两片水晶平板起滤波作用,因此几乎没有莫尔条纹和伪彩色残余,但是由于第二块水晶平板的方向性,造成了图像滤波效果在 45° 和 135° 的不对称.

图 6 中的局部放大图选自相对应的整体效果图中莫尔条纹和伪彩色最严重的部分,可以发现,“两层四点”式和“三层四点”式的滤波图像仍有部分的莫尔条纹和伪彩色残余,而“三层八点”式的滤波图像的莫尔条纹和伪彩色均抑制得比较理想.

综上所述,在 F 数为 2.8,即理想光学系统空间截止频率为 649 lp/mm 的条件下,以“三层八点”式的滤波效果最好,“两层四点”式的和“三层四点”式的滤波效果较接近,以“三层四点”式的滤波效果最差,实验结果与计算结果符合得很好.

7. 结 论

为了评价多种类型各种结构 OLPF 的滤波性能,建立了一个包含 OLPF 的二维数字光学成像系统模型,并在此模型的基础上构建了 OLPF 的评价函数.选择其中具有代表性的三种结构,即“两层四点”式、“三层四点”式和“三层八点”式 OLPF 进行滤波性能分析.计算结果表明,随着理想光学系统空间截止频率的增加,三种结构 OLPF 的滤波性能均有先微弱增强,后迅速减弱的趋势;当理想光学系统的空间截止频率小于 410 lp/mm,即光学系统 F 数大于 4.4

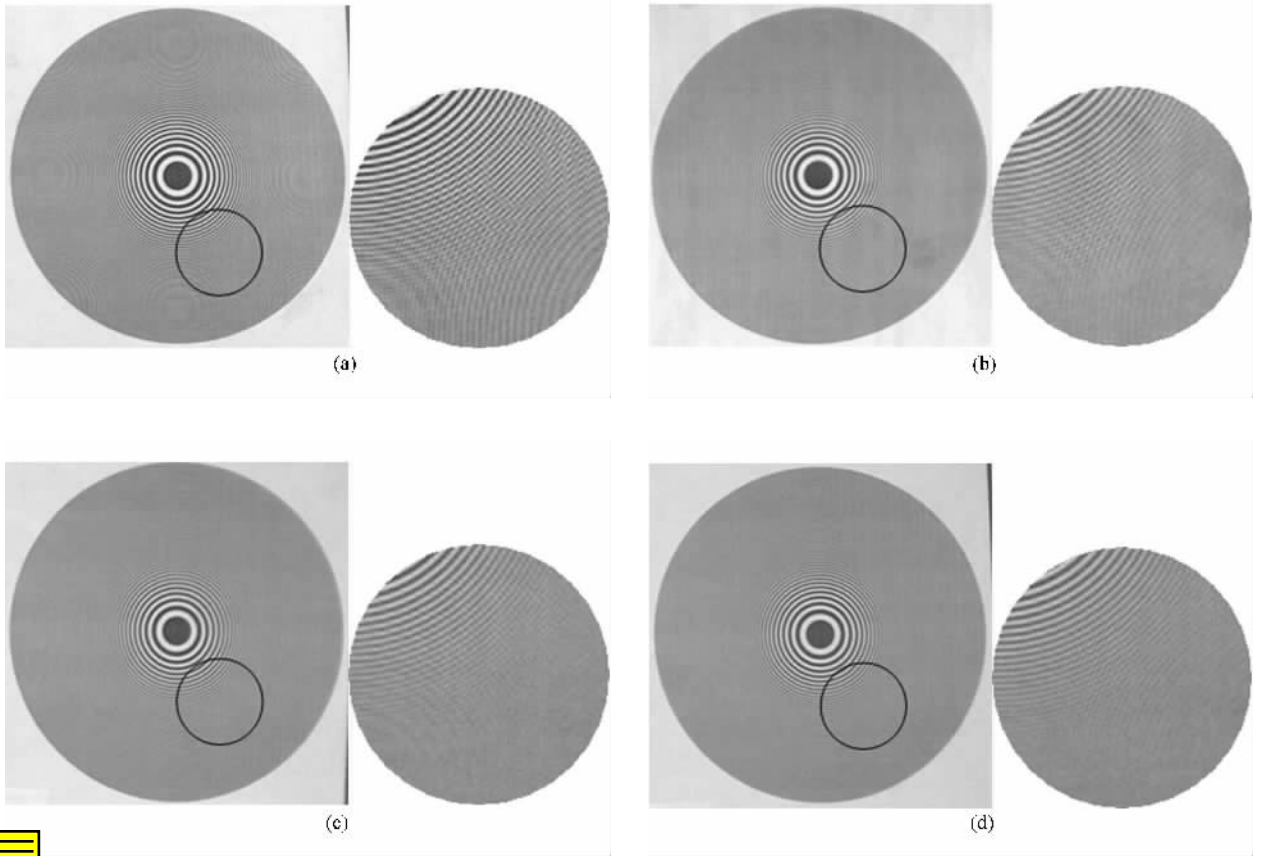


图6 嵌入不同结构 OLPF 时的波带片图像(其中左图为整体效果图,右图为左图中黑色圆圈部分的放大图)(a)无 OLPF 时的波带片图像;(b)嵌入“两层四点”式 OLPF 时的波带片图像(c)嵌入“三层四点”式 OLPF 时的波带片图像(d)嵌入“三层八点”式 OLPF 时的波带片图像

时,嵌入“两层四点”式 OLPF 的数字成像系统低通滤波性能较其余两种结构好,当理想光学系统的空间截止频率大于 410 lp/mm ,即光学系统 F 数小于 4.4 时,嵌入“三层八点”式 OLPF 的数字成像系统低通滤波性能较其余两种结构有很大的提升;当 F 数为 2.8,即理想光学系统空间截止频率为 649 lp/mm

时,“三层八点”式的 OLPF 的滤波性能相对于“两层四点”式和“三层四点”式评价函数值 Δ 分别减小了 28.3% 和 37.5%,即其滤波性能有较大幅度的改善,性能分别改善了 28.3% 和 37.5%。最后,成像滤波实验结果与计算结果符合得较好,验证了该模型和评价函数的正确性。

- [1] Wittenstein W, Fontanella J C, Newbery A R, Mars J 1982 *Opt. Acta.* **29** 41
- [2] Xia G, Huang D X, Yuan X H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2212 (in Chinese)[夏 舸、黄德修、元秀华 2007 物理学报 **56** 2212]
- [3] Oh Y H, Go C S, Lee J C, Lim S, Kim S 2001 *SPIE* **4594** 408
- [4] Oh Y H, Lee J C, Lim S, Kim S, Go C S 2003 *Opt. Eng.* **42** 994
- [5] Go C S, Lee J C, Oh Y H, Lim S, Kim S 2001 *SPIE* **4594** 417
- [6] Qi X J, Lin B, Cao X Q, Chen Y Q 2007 *Journal of Optoelectronics · Laser* **18** 150 (in Chinese)[戚翼骏、林 斌、曹向群、陈钰清

2007 光电子·激光 **18** 150]

- [7] Qi X J, Lin B, Liang J, Chen B, Cao X Q 2006 *SPIE* **6351** 63510W1
- [8] Euliss G W, Van der Gracht J 2001 *Appl. Opt.* **40** 6492
- [9] John E G 1990 *Appl. Opt.* **29** 676
- [10] Oono M 2004 *U. S. patent* 6 742 531 ,B2
- [11] Noguchi M 2005 *U. S. patent* 6 940 648 ,B2
- [12] Hayakawa S 2005 *U. S. patent* 6 963 448 , B1
- [13] Van der Gracht J, Euliss G W, Pauca V P 2002 *SPIE* **4736** 99

Study of modular transfer function-based optical low-pass filter evaluation model and experiment^{*}

Qi Xun-Jun^{1,2)†} Lin Bin¹⁾ Cao Xiang-Qun¹⁾ Chen Yu-Qing¹⁾

1) *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, National Research Center of Engineering and Technology for Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China*

2) *The College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China*

(Received 3 July 2007 ; revised manuscript received 29 August 2007)

Abstract

To evaluate the performance of optical low pass filter (OLPF) accurately, a new 2D digital imaging system model including an OLPF was created for the first time using the modular transfer function (MTF). An evaluation function was also established based on this model. To manifest the model and its evaluation, three typical OLPFs were studied. The results show that the Δ value of each filter undergoes a slow and slight decrease and then rapidly increases when the ideal optical system cutoff frequency is increased. The optical system embedded with the 2-chip-4-point type OLPF created a better image than those with the other two OLPF's when the F number is greater than 4.4; whereas the OLPF of 3-chip-8-point type worked best when the F number is lower than 4.4. When the F number of the optical system is 2.8, namely, with a spatial cutoff frequency of 649 lp/mm, the filter of 3-chip-8-point type performs better than that of the 2-chip-4-point and 3-chip-4-point types. The Δ value of the first filter is 28.3% and 37.5%, lower than that of the other two filters, respectively. That is, the filter performance is 28.3% and 37.5% higher. Finally, spatial frequency test shows that the moiré fringe and false colors can be seen in the last two pictures, while in the first, these effects are well eliminated. The theoretical calculations agree with the experimental results.

Keywords : optical low pass filter, modulation transfer function, evaluation function, spatial frequency

PACC : 0768, 0760, 4280

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2004AA001019).

[†] E-mail : xunjunqi@163.com