

文章编号 1004-924X(2007)07-1026-06

含三次位相元件照相物镜的设计

杨皓明¹, 张 新², 方志良¹, 雷广智², 张 欣²

(1. 南开大学 现代光学研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:设计了一个光学/数字成像系统,该成像系统利用三次位相元件辅以数字图像处理技术,在保持系统光通量及分辨率不变的前提下,提高了光学系统焦深。进行了仿真实验,实验以传统的双高斯型照相物镜为光学系统模型,选取焦点及离焦 $-1.6\lambda(\lambda=550\text{ nm})$ 近似 -6.4 倍焦深两个成像位置。对比分析了传统光学系统及光学/数字系统的焦点位置调制传递函数(MTF)、离焦 1.6λ 处调制传递函数(MTF)及在瑞利判据 ± 100 倍焦深范围内的离焦传递函数。通过光学设计软件CODEV9.7新增图像模拟功能,得到了光学系统的模拟成像结果。利用自编图像处理程序,得到最终的成像结果。结果表明,该光学/数字成像系统确实能够有效扩大光学系统焦深6倍以上。

关键词:照相物镜;光学设计;位相板;焦深

中图分类号: TB851.1 **文献标识码:** A

Design of a photographic objective using cubic phase plate

YANG Hao-ming¹, ZHANG Xin², FANG Zhi-liang¹, LEI Guang-zhi², ZHANG Xin²

(1. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology,*

Institute of Modern Optics, Nankai University, Ministry of Education, Tianjin 300071, China;

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)*

Abstract: An optical/digital imaging system is proposed. This system uses a cubic phase element and digital image processing to increase the depth of focus in keeping the same illumination and resolution. Two positions, $-1.6\lambda(\lambda=550\text{ nm})$ and in focus, are analyzed in simulation. Then both modulate transformation function (MTF) and the relationship between the MTF and focus in a longer depth of focus are given. Using the imaging simulation tools CodeV, the simulation images are obtained. After digital processing, the final image is also obtained. Experimental results show that this new optical/digital system can increase the depth of focus by 6 times at least.

Key words: photographic objective; optical design; phase plate; depth of focus

1 引言

通过特殊光瞳形式提高光学系统焦深是光学

成像领域中比较热门的研究之一,现在采用的方法主要有环形光瞳法^[1]、切趾法^[2]、及菲涅尔波带片法^[3]等。这些方法或者减少光通量或者损失分辨率,因此并没有得到广泛的工程化应用。波前

编码(WFC)技术^[4]是近些年来解决系统焦深问题较成功的方法之一,其基本思想是:通过特殊位相元件,使光学系统点扩散函数(PSF)在一定焦深范围内与位置无关。采用数字方法后,可在整个离焦范围内获得清晰的成像结果。由于采用全孔径位相光瞳的形式,该方法可以在保持光通量及分辨率不变的情况下,提高光学系统焦深。

该领域在国内目前处于理论研究阶段,西安光机所做了大量有意义的理论探索^[5-6]。本文工

作主要是在波前编码技术理论的基础上,着重探讨其在光学系统中的应用问题。以典型双高斯型照相物镜作为光学系统模型,模拟了包括数字处理在内的整个波前编码技术的成像过程。

2 设计方法

(1)选取典型双高斯结构形式,通过设计得到具有以下光学特性的光学成像系统模型^[8-10]:

表1 双高斯成像系统模型典型光学参数

Tab.1 Typical optical parameters of double-Gauss system

F/#	Full field of angle	Focus length	Focus depth in theory	CCD cutoff frequency
1.7	25°	50 mm	±2.98 μm	50 lp/mm

注:CCD像元尺寸为12 μm,参考波长为586.4 nm

图1为系统结构图。表2为系统结构参数,孔径光阑位于前后两组中间。该系统离焦使用,系统最佳像面处位于-0.056 2 mm。

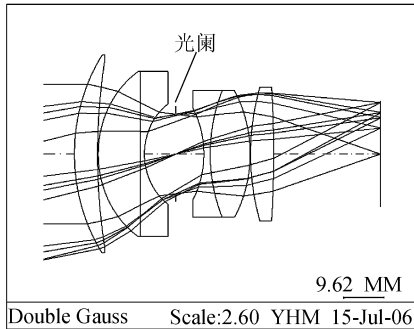


图1 系统结构图

Fig.1 Layout of double-Gauss system

表2 系统结构参数

Tab.2 Structure parameters in system

Surface	Radius	Thickness	Glass
1	36.288	5.5	LAF3_CHINA
2	113.607 2	0.15	
3	20.615 4	10	BAFD7_HOYA
4	-214 3	1	ZF6_CHINA
5	12.735 8	7.5	
stop	infinity	6.65	
7	-19.162	1.5	ZF1_CHINA
8	32.434 9	9.5	LAK3_CHINA
9	-25.768 7	0.1	
10	45.695 5	5.5	LAF3_CHINA
11	-203.262	25.372 94	
像面	infinity	0	

(2)在图1所示孔径光阑处加入透射式三次位相板,构成三次位相板系统(以下简称为CPP系统)。该位相板具有位相形式^[4]:

$$P(x, y) = e^{i\alpha(x^3 + y^3)} \quad x^2 + y^2 \leq 1, \quad (1)$$

其中 α 用于控制位相板最大位相变化。根据文献^[4],当位相板位相变化值 $>10\lambda$ 时,三次位相板使系统点扩散函数对成像位置不敏感。又:

$$\alpha = \frac{2\pi\xi}{\lambda}, \quad (2)$$

ξ 为位相板产生的光程差。根据光阑前后间隔,位相板基底厚2 mm(该厚度对离焦容限无影响,轴上有平移量),材料为K9玻璃,折射率1.516 3。式(2)中 ξ 是空气中的光程差,计算时要根据所选玻璃折射率折算成实际光程差。图2为位相板面型示意图。本文设计采用的位相板位相PV值为 20λ 。主要是考虑到市场上有这类的工业级产品,可减低整机的研发周期。该位相板具体参数请对照参考文献^[7]。

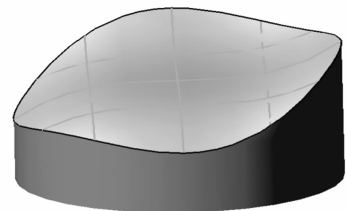


图2 位相板示意图

Fig.2 Phase plate

(3)对于 $f/1.7$ 的系统,理论上 $\pm 3.28 \mu\text{m}$ 为对应瑞利判据 $\pm \lambda/4$ 光程差的焦深^[8], 1.6λ 近似对应 0.02 mm 的离焦量,该数值为瑞利判据的 6.4 倍。考虑最佳像面位置后,该离焦量实际成像位置在 $-0.076 2 \text{ mm}$ 处。同时,本文给出瑞利判据 100 倍焦深范围内 $\pm 0.328 \text{ mm}$ 离焦范围的离焦传递函数。

(4)成像模拟。利用 CODEV \rightarrow Analysis \rightarrow Diffraction \rightarrow 2D Image Simulation,模拟成像目标 A 为美国空军标准靶。图像大小为 $2 775 \times 2 810$ 。(图 6 所示)

(5)图像恢复。由于三次位相板系统 MTF 无零点,故可以采用简单直接滤波的方法进行图像恢复。采集 CPP 系统不同离焦位置(包括焦点处)点扩散函数(PSF)数据,设计数字滤波器。将这个滤波器首先对点物成像的编码像进行滤波,以验证其准确性,滤波后应得到一个近似衍射极限的 PSF 图像。然后用该滤波器对模拟成像目标 A 的编码像进行滤波,得到最终成像结果。

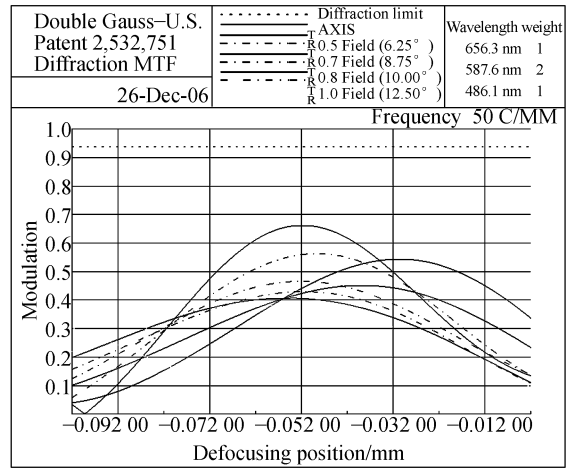
3 结果与讨论

3.1 传统系统与光学/数字系统离焦传递函数

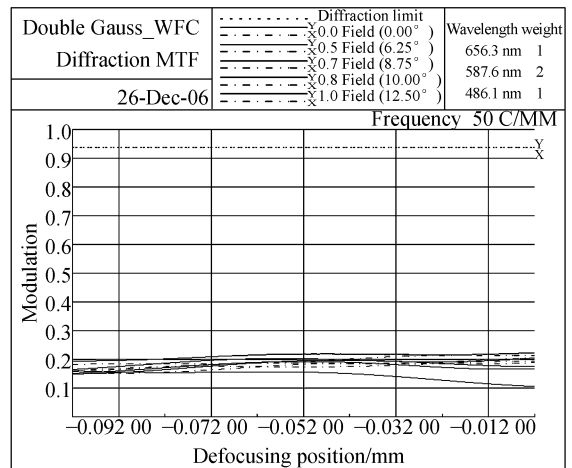
上述传统双高斯光学系统最佳像面位于 -0.052 mm 离焦位置。图 3 给出离焦 -1.6λ 即离焦量为 -0.072 mm 情况下传统系统及 CPP 系统截止频率处的离焦传递函数。图 3(a)是传统系统截止频率处的离焦传递函数,观察发现离焦传递函数随离焦量的增大而急剧下降,并在 -0.102 mm 附近出现零值,空间频率信息丢失,说明传统系统的离焦容限是有限的。图 3(b)为 CPP 系统离焦传递函数曲线,对比发现在同样的离焦范围内, CPP 系统离焦传递函数变化平稳,虽然截止频率处 MTF 的值下降到 0.2 左右,但整个离焦范围内 MTF 无零点出现。研究表明,当下降的 MTF 仍满足数字滤波所需信噪比时,即可在整个离焦范围内重获理想焦点处成像效果。MTF 下降几倍表明信噪比 SNR 下降几倍。本例中,理想焦点位置截止频率处 MTF 近似下降 2 倍,则 SNR 也下降两倍。

3.2 传统系统与光学/数字系统传递函数

图 4(a)是传统系统理想像面位置的 MTF 曲



(a)



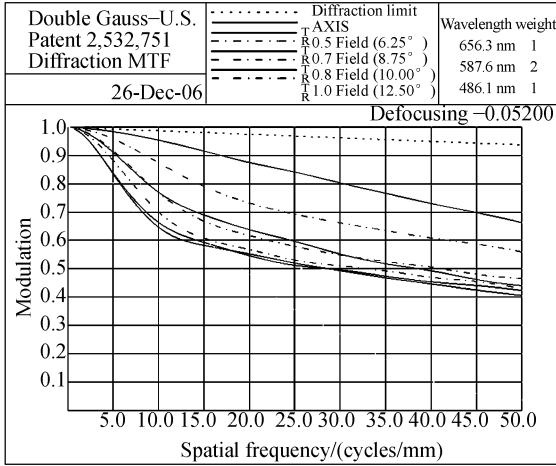
(b)

图 3 传统系统及 CPP 系统的离焦传递函数曲线(离焦量 $\pm 0.3 \text{ mm}$ Naquist 截止频率 50 lp/mm)

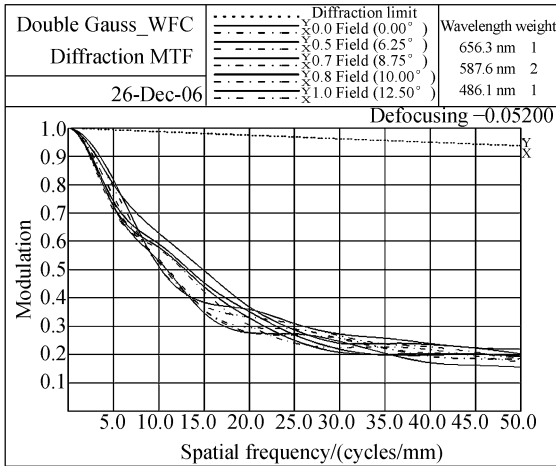
Fig. 3 Defocus MTF curves of traditional system and CPP system

线。除 1 视场外,各个空间频率位置 MTF 值基本在 0.4 以上,满足成像要求。图 4(b)为 CPP 系统在理想像面处的 MTF 曲线。除 1 视场外,各视场 MTF 均比(a)中有所降低,但在各个空间频率,MTF 具有基本相同的值。MTF 的这种分布有利于进行数字方法的补偿。为更好地说明问题,(c)、(d)给出两种系统离焦 -0.072 mm 处即离焦 1.6λ 的 MTF 曲线。显见离焦后,传统系统的 MTF 曲线变化剧烈,在各个空间频率位置处大部分视场 MTF 值均下降。而 CPP 系统在离焦后,MTF 曲线对比理想像面处 MTF 曲线基本

无变化, 没有空间信息丢失。可以说, CPP 系统通过三次位相对整个空间信息进行编码, 编码图像对比度有所下降, 却不会损失信息。又由于编码方式是先验的, 所以能够设计得到合理的滤波器对其进行解码。同时还发现, 经过编码后, MTF 基本与视场无关的。



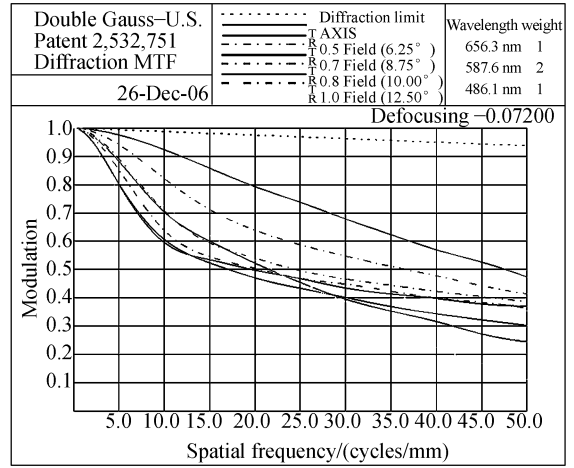
(a)



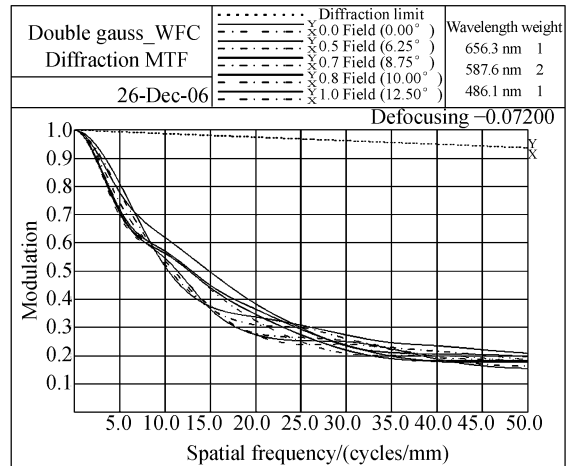
(b)

3.3 模拟成像结果

图 5 所示为模拟成像物目标, 通过 CodeV 图像模拟功能, 分别得到传统系统及 CPP 系统焦点位置 -0.052 mm 及离焦 6.4 倍 (-0.072 mm) 模拟成像结果, 如图 6 和图 7 所示。为更清晰可见, 将所得成像结果截取成如图 5 中所示的小区域。



(c)



(d)

图 4 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves

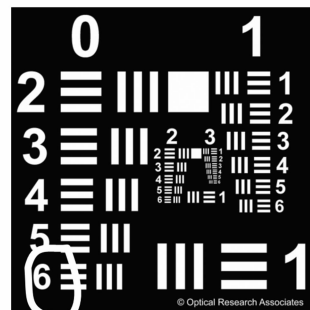
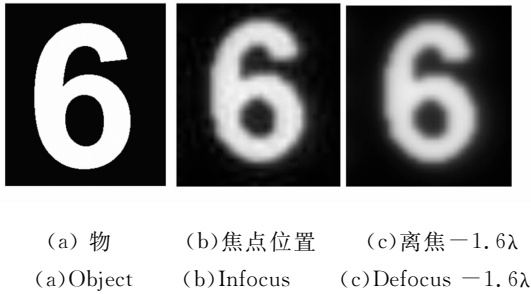


图 5 模拟成像目标 A

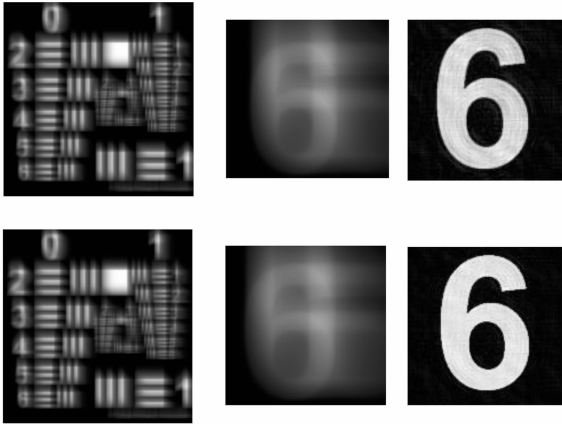
Fig. 5 Object



(a) 物 (b) 焦点位置 (c) 离焦 -1.6λ
(a) Object (b) Infocus (c) Defocus -1.6λ

图 6 传统系统焦点及离焦成像模拟结果

Fig. 6 Imaging results of traditional system



(a) 全局图 (b) 局部放大图 (c) 局部复原图
(a) Full (b) Part (c) recovered part

图 7 CPP 系统成像模拟结果

Fig. 7 Imaging results of CPP system

图像复原主要通过获得系统准焦位置 PSF 矩阵实现的。经过傅里叶计算得到系统 OTF。由于在模拟实验中,未考虑实际测量误差,因此简单的逆滤波即可实现编码图像的解码。对于离焦图像,仍用准焦 OTF 来恢复,因此在结果中可以观察到经解码后两个位置的成像差异。

4 结 论

以上模拟实验结果表明,在保持光通量及分辨率的前提下, CPP 系统确实能够有效扩大光学系统焦深。同时与纯光学扩大焦深方法相比, CPP 系统具有应用范围更广,所受局限性更小等优点。因此,结合光学/数字 CPP 扩大光学系统焦深的方法,是该领域中极具前景的研究方向。

参考文献:

- [1] MINO M, OKANO Y. Improvement in the OTF of a defocused optical system through the use of shaded apertures [J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10(10): 2219-2225.
- [2] OJEDA-CASTANEDA J. High focal depth by apodization and digital restoration[J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(12): 2583-2586.
- [3] OJEDA-CASTANEDA J. Zone plate for arbitrarily high focal depth[J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(7): 994-997.
- [4] DOWSKI E R, CATHEY Jr W T. Extended depth of field through wavefront coding[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(10): 1859-1866.
- [5] 惠彬, 刘新平, 汶德胜, 等. 扩大光学系统焦深范围的光学成像新技术研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 594-597.
HUI B, LIU X P, WEN D SH, *et al.*. A new technology of large depth of focus of incoherent optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 30(5): 594-597. (in Chinese)
- [6] 汶德胜, 车双良, 乔卫东, 等. 大焦深成像系统仿真实验研究[J]. *光子学报*, 2003, 32(5): 618-621.
WEN D SH, CHE SH L, QIAO W D, *et al.*. Simulation of a large Depth-of-focus Imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 32(5): 618-621. (in Chinese)
- [7] <http://www.cdm-optics.com>[OL].
- [8] ROBERT F, FISCHER, BIJANA T. *Optical System Design*[M]. McMillan, 2000.
- [9] 杨皓明, 王灵杰, 翁志成, 等. 大孔径大视场轻小型星敏传感器光学系统设计[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(2): 151-154.

YANG H M, WANG L J, WENG ZH CH, *et al.*. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):151-154. (in Chinese)

[10] 杨皓明, 王灵杰, 冯秀恒. 一种新型复合摄像物镜的设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4):486-491.

YANG H M, WANG L J, FENG X H. Design of a new complex imaging object lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):486-491. (in Chinese)

作者简介:杨皓明(1980—),女,吉林长春人,2003年毕业于大连理工大学,现为南开大学博士研究生,主要从事光学设计及特殊光电成像镜头的研究。E-mail: yanghaoming@mail.nankai.edu.cn