

文章编号:1001-9014(2004)06-0473-04

一种在离焦情况下获得高分辨率图像的新技术

惠彬¹, 裴云天¹, 汶德胜²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要:在遥感、军事侦察和医疗成像等领域,需要得到目标的高分辨率图像,而像面离焦直接影响了成像质量、降低了空间分辨率。为了得到高分辨率图像,往往采用自动焦面补偿装置或温控系统来克服离焦现象,但这又不利于仪器的小型化和轻量化。本文提出,在光学系统光路中加入一特殊设计的非球面掩模板,并对经过位相掩模板后的图像进行图像处理得到清晰图像。使光学系统在大离焦量的情况下仍可获取高分辨率的图像。这对于光学遥感器在复杂的空间环境中获取高分辨率图像具有十分重要的意义。

关键词:分辨率;离焦;位相掩模板;光学传递函数;模糊函数

中图分类号:043.19 **文献标识码:**A

NEW TECHNOLOGY TO ACQUIRE HIGH RESOLUTION IMAGE UNDER LARGE DEFOCUS

HUI Bin¹, PEI Yun-Tian¹, WEN De-Sheng²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: In domain of reconnaissance, remote sensing etc., people want to get high resolution image. There has a conflict between the resolution and optical system defocus. In order to acquire high resolution image, some ways are taken to diminish the defocus, but these ways affect the cost and weight of the system. In this paper, a novel technology was described for extending the depth of focus of incoherent optical systems that does not decrease the resolution of the image. This technology uses generalized aspheric optics to encode images to be invariant to defocus, and digital signal processing to decode the images. It is significant for optical remote sensor to acquire high resolution image under complicated space environment.

Key words: resolution; defocus; phase mask plate; optical transfer function; ambiguity function

引言

空间分辨率是衡量光学遥感器性能的一项重要指标。追求更高分辨率的遥感图像已成为各国侦察卫星的发展目标。但在光学遥感器实际应用中,复杂的空间环境变化引起光学系统像面离焦,影响了系统的空间分辨率。通常对遥感图像进行后期图像处理以提高分辨率,但是当像面离焦严重时,光学系统的调制传递函数 MTF 出现零值,造成空间频率的丢失,从而无法传递该频率所对应的空间信息,降低了恢复后的图像质量,此外,常用的光学系统需在已知离焦量的条件下进行图像恢复,但在光学遥感器的多数情况下,离焦量是难以预测的。如何解决离焦与

分辨率之间的冲突是一项很有意义的研究工作。

本文提出了大焦深成像技术,该技术通过位相板编码和图像处理解码使系统在较大离焦量的情况下仍可获得高分辨率的清晰图像。该技术的应用有助于解决光学系统图像恢复中的问题。此外,如果能将该技术成功应用于光学遥感系统中,将有助于实现系统的小型化和轻量化。

该技术是国际上近几年发展起来的一种新技术,已初步在高倍率内窥镜、三维断层成像以及红外光学系统中得到应用^[1]。美国的 Colorado 大学成像系统研究实验室以及美国的 Army Research Laboratory 近年来都在深入开展该技术以及其工程化应用的研究。

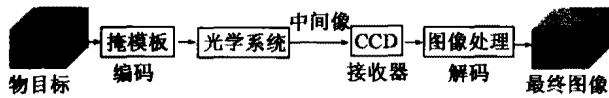


图1 系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

1 基本原理

如图1所示,大焦深光学成像技术即指将三次位相板置于光路中,对非相干光波前进行编码,形成一个对离焦不敏感的中间像,再用数字图象处理技术对中间像进行解码,使光学系统在离焦较大的情况下仍可得到清晰像,提高分辨率。

2 理论基础

大焦深光学成像新技术是以模糊函数(Ambiguity Function)及稳相法(Stationary Phase Method)为其数学基础.通过建立模糊函数及光学系统的光学传递函数之间的关系,得到设计的位相掩模板从而改变光瞳函数.利用设计光学系统的光瞳函数形式可使成像系统的成像质量在一定离焦范围内达到所期望的性能^[2].

光学系统的像差使出瞳上波前产生变形,发生离焦时,即相当于光瞳函数多了一个二次位相因子.在规一化坐标下,一维的位相函数通常表示为

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\theta(x)), & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

x : 归一化的空间坐标

其中: $\theta(x) = \alpha x^\gamma$, $\gamma \neq \{0, 1\}$ $\alpha \neq 0$

模糊函数定义为^[3]

$$A(u, y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(v + \frac{u}{2}) p^*(v - \frac{u}{2}) \exp(j2\pi v y) dv. \quad (2)$$

y : 归一化的空间坐标

则根据式(1)和式(2)可写为

$$A(u, y) = \frac{1}{2} \int_{-(1-|u|/2)}^{1-|u|/2} e^{j\theta(x)} \times e^{j2\pi y x} dx, \quad |u| \leq 2 \quad (3)$$

其中: $\theta(x) = a \left[\left(x + \frac{u}{2}\right)^\gamma - \left(x - \frac{u}{2}\right)^\gamma \right]$, 为了求

解式(3),利用稳相法^[4]: 稳相点 x_i 为

$$\frac{d}{dx} [2\pi y x + \theta(x)]_{x=x_i} = 0, \text{ 即: } 2\pi y + \gamma a \left(x_i + \frac{u}{2}\right)^{\gamma-1} - \gamma a \left(x_i - \frac{u}{2}\right)^{\gamma-1} = 0. \quad (4)$$

式(3)则可写为^[5]

$$A(u, y) \approx A_a(u, y) = \frac{1}{2} \int_{x_i-\epsilon}^{x_i+\epsilon} e^{j[\theta(x)+2\pi y x]} dx, \quad (5)$$

式(5)中 2ϵ 指积分有意义的区域. 位相部分在 x_i 点进行 Taylor 展开, 忽略二阶以上项. 积分最后

$$A(u, y) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{|\theta''(x_i)|}} \exp\left[j\left[2\pi y x_i + \theta(x_i) \pm \frac{\pi}{4}\right]\right] = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{|\theta''(x_i)|}} \exp[j\phi(y)] = \frac{1}{2} \sqrt{\left|\frac{dx_i}{dy}\right|} \exp[j\phi(y)]. \quad (6)$$

由式(4)可以看出要使 OTF 的模 (MTF) 与离焦无关, 则应使 $\theta''(x_i)$ 与 y 无关 (也就是 x_i 随 y 线性变化). 由式(4)可看出, 当 $\gamma=3$ 时满足此条件, 即三次位相函数满足此条件. 静态位相点为

$$2\pi y + 3a(2x_i u) = 0, \text{ 得出 } x_i = -\frac{\pi y}{3au}, \quad u \neq 0 \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得:

$$A(u, y) \approx \sqrt{\frac{\pi}{12|au|}} \exp\left(\frac{au^3}{4}\right) \exp\left[-j\left(\frac{\pi^2 y^2}{3au}\right)\right], \quad u \neq 0 \quad (8)$$

成像系统的光学传递函数 $H(u)$ 可用其光瞳函数 $Q(u)$ 的自相关表示. 有离焦像差的光学系统, 其光学传递函数可表示为

$$\begin{aligned} H(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} Q(v + u/2) Q^*(v - u/2) dv \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} P(v + u/2) P^*(v - u/2) \times \\ &\quad \exp(j2\pi \frac{2w_{20}}{\lambda} uv) dv. \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中 v, u : 规一化的空间频率, w_{20} : 离焦引起的最大波像差, p : 光学系统的孔径函数由式(9)和式(2)可得 OTF 与 AF(Ambiguity Function)的关系式:

$$H(u) = A\left(u, \frac{2W_{20}}{\lambda} u\right). \quad (10)$$

由式(8)和式(10)可得:

$$H(u) \approx \sqrt{\frac{\pi}{12|au|}} \exp\left(j\frac{au^3}{4}\right) \exp\left[-j\frac{\pi^2 4W_{20}^2 u}{3a\lambda^2}\right], \quad u \neq 0 \quad (11)$$

以上通过分析得到符合要求的位相掩模形式为

$$p(x, y) = \exp(ja(x^3 + y^3)), \quad a \gg 20 \quad |x| \leq 1 \quad (12)$$

式中 a 为一常数. 在三次位相系统中, 增大 a 值可降低 PSF 对离焦的敏感度. $a = 2\pi\xi/\lambda$, λ 为设计所用的波长, ξ 为掩模板所产生的光程差. 通过控制 a 可控制 MTF 对离焦不敏感的范围.

通过以上分析可看出:若三次位相因子作用于光瞳函数时,三次位相因子将会产生三次位相分布,当发生离焦三次取代二次位相起主导作用时,在一定范围内 OTF 的幅值(MTF)就对离焦变化不敏感.

3 仿真实验

3.1 仿真模型

仿真试验流程图如图 2 所示.

3.2 仿真结果

以下是我们对大焦深新型光学系统与普通光学系统 2 种成像系统的 PSF 仿真结果对比:

在仿真实验中我们取光学系统的 F 数为 4, CCD 的象素尺寸为 $10\mu\text{m}$, λ 为 650nm . a 为 20π . 图 3(a) ~ 图 3(d) 是 2 种光学系统模型的 PSF 比较,从图中我们可以看出:当波像差为 0 时,新型光学系统的 PSF 不如普通成像系统的 PSF 理想,但是当波像差变化量相同时,普通成像系统的 PSF 随着离焦波像差变化较大,而新型光学系统的 PSF 随着离焦波像差的变化就比较小. 也就是说,新型光学系统的 PSF 对离焦变化不敏感.

以下是对普通光学系统和新型光学系统进行计算机仿真实验的结果比较. 我们对中间像所进行的图像处理主要包括四步:第一步是设计滤波器,也就是光学系统的点扩散函数. 第二步是正则化处理. 第三步是建立噪声模型. 第四步是根据噪声模型设计 Wiener 滤波器. 图 4(a) 是模拟输入的数字化目标,图 4(b) 是普通光学系统在离焦波像差 $w = 3\lambda$ 时所得到的图像. 图 4(c) 是采用新技术后的新型光学系统在离焦波像差 $w = 3\lambda$ 情况下所得到的经位相掩模板编码后的中间像. 图 4(d) 是普通光学系统的离

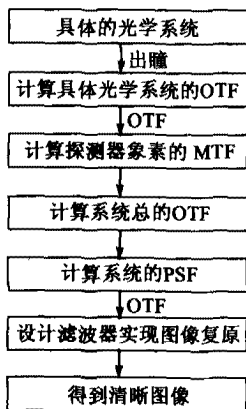


图 2 仿真实验流程图
Fig. 2 The flow chart of simulation

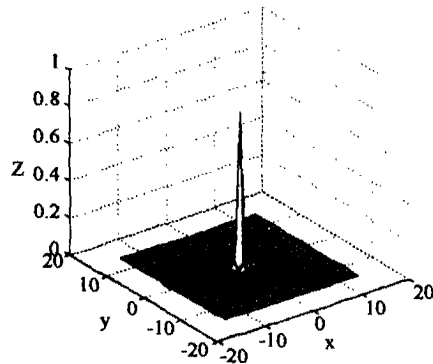


图 3(a) 普通光学系统未离焦的 PSF
Fig. 3(a) The in focus PSF of the traditional optics

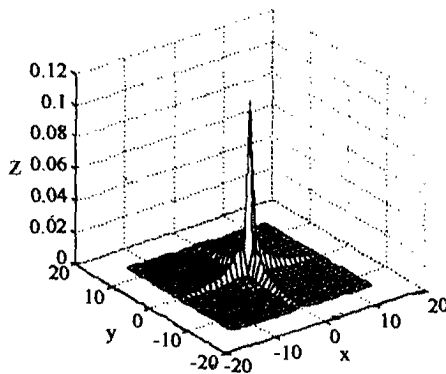


图 3(b) 新型光学系统未离焦时的 PSF
Fig. 3(b) The in focus PSF of the novel optics

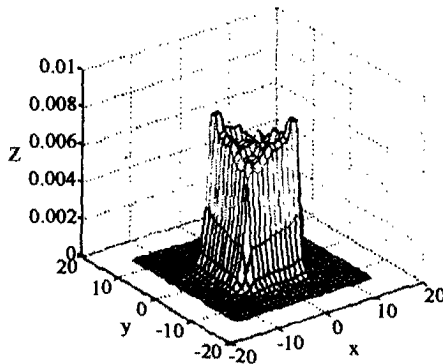


图 3(c) 波像差 $w = 3\lambda$ 时普通光学系统的 PSF
Fig. 3(c) The PSF of the traditional optics when $w = 3\lambda$

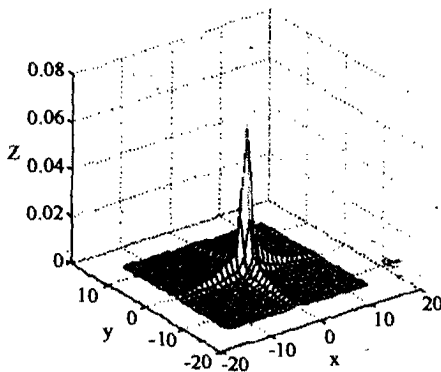


图 3(d) 波像差 $w = 3\lambda$ 时新型光学系统 PSF
Fig. 3(d) The PSF of the novel optics when $w = 3\lambda$

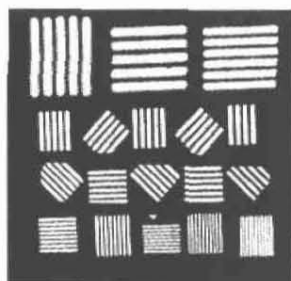


图4(a) 模拟输入的数字化物目标
Fig.4(a) The simulated input digital target

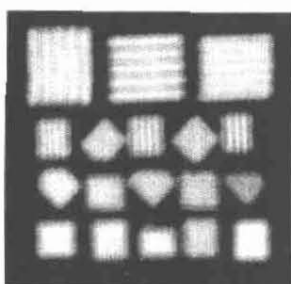


图4(b) 普通光学系统离焦时获取的图像
Fig.4(b) Final image of the traditional systems after filtering

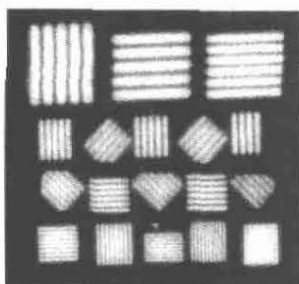


图4(c) 新型光学系统离焦时获取的中间图像
Fig.4(c) The defocus intermediate image of the novel optical system

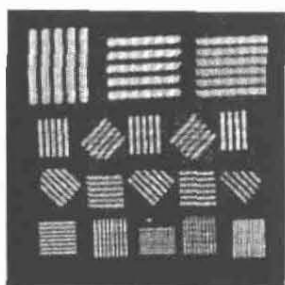


图4(d) 普通光学系统恢复离焦像后所得到的清晰像
Fig.4(d) Final image of the traditional systems after filtering

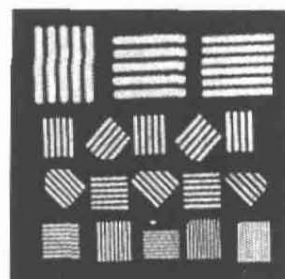


图4(e) 新型光学系统恢复后得到的清晰像
Fig.4(e) Final image of the novel systems after filtering

焦像经过图像处理后的最终图像.图4(e)是将新型光学系统的中间像进行图像处理后的清晰、聚焦的图像.通过以下仿真实验的结果可看出:采用本项技术,使光学系统在离焦情况下也可得到清晰的高分辨率图像.

4 结语

本文提出的大焦深新型光学成像技术与普通成像技术相比,该技术可使光学系统在大离焦范围内获取高分辨率的图像,对光学系统实际应用中像面离焦对图像分辨率的影响提出了解决方法.此外,普通光学系统必须知道离焦量才能够恢复,并且在大量离焦量时奇异点很多,图像恢复变得十分困难,效果较差;新型光学系统不要求知道离焦量,并且逆运算时没有零点,可以用同一公式恢复不同离焦量时的真实象,这对于解决光学遥感中图像恢复问题有其应用意义.

REFERENCES

- [1] Tucker Sara C, Dowski Edward R, Cathey W Thomas. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems [J]. *Optics Express*, 1999, 4(8): 467—474.
- [2] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wave-front coding [J]. *Appl. Opt.* 1995, 34(10): 1859—1866.
- [3] Brenner K, Lohman A, Ojeda-Casteneda J. The ambiguity function as a polar display of the OTF [J]. *Opt. Commun.* 1983, 44(5): 323—326.
- [4] Born M, Wolf E. *Optical Principle* [M]. Beijing: Science Press (玻恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理. 北京: 科学出版社), 1978.
- [5] Key E L, Fowle E N, Haggarty R D. A method of designing signals of large time-bandwidth product [J]. *Ire Internal Convention Record*, 1961: 146—155.