

大视场 Ritchey-Chretien 光学系统的间接成像方法

郑汉青, 崔庆丰*, 胡洋, 孙林, 郭玉, 高旭东

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 Ritchey-Chretien(R-C)光学系统广泛应用于航空和航天等远距离探测领域,因其视场较小,所以通常采用附加光学元件的方法实现大视场成像,但这会导致结构复杂,不利于系统实现小型化和轻量化。鉴于此,提出一种 R-C 系统间接成像方法。首先分析系统的像差特性,接着基于波前像差理论和 Zernike 多项式构建波前模型,然后通过傅里叶变换建立 PSF 模型,最后结合反卷积算法处理图像。在仅采用主、次镜的情况下,可以实现 R-C 系统大视场成像。对焦距为 1300 mm、全视场为 0.9° 和 F 数为 4 的 R-C 光学系统进行仿真模拟。模拟结果表明,所提方法的 MTF 在频率为 40 cycle/mm 处平均提升约为 0.25,成像质量显著提升。

关键词 光学设计; 图像复原; 计算成像; 点扩散函数; Ritchey-Chretien 光学系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0522002

Indirect Imaging Method of Ritchey-Chretien Optical System with Large Field of View

Zheng Hanqing, Cui Qingfeng*, Hu Yang, Sun Lin, Guo Yu, Gao Xudong

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Ritchey-Chretien (RC) optical system is widely used in long-distance detection fields such as aviation and aerospace. Due to its small field of view, additional optical elements are usually used to achieve large field of view imaging, but this will lead to a complex structure, which is not good for miniaturization and lightweight of the system. In view of this, a R-C system indirect imaging method is proposed. First, the aberration characteristics of the system are analyzed. Then, the wavefront model is constructed based on the wavefront aberration theory and Zernike polynomial. Second, the PSF model is established by Fourier transform. Finally, the image is processed by combining the deconvolution algorithm. In the case that only primary and secondary mirrors are used, the R-C system can achieve large field of view imaging. The R-C optical system with a focal length of 1300 mm, a full field of view of 0.9° and an F number of 4 is simulated. The simulation results show that the MTF of the proposed method increases by about 0.25 on average at a frequency of 40 cycle/mm, and the imaging quality is significantly improved.

Key words optical design; image restoration; computational imaging; point spread function; Ritchey-Chretien optical system

OCIS codes 220.3620; 100.3020; 110.1758

1 引言

Ritchey-Chretien(R-C)系统是一种反射式光学

系统,具有紧凑结构、无色差、易于实现无热化和多工作波段的优点,广泛应用于航空、航天、天文、探测和空间光通信等领域。R-C 光学系统在卡塞格林光

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-09-13; 录用日期: 2020-10-16

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

* E-mail: qf_cui@163.com

学系统的基础上,利用主、次镜的圆锥系数可以同时校正球差和彗差,并且在一定程度上扩大了视场^[1-4]。

R-C 光学系统的视场约为 $20'$,与卡塞格林光学系统相比有一定的增大^[5],但仍然无法满足实际的需求。为了实现 R-C 光学系统的大视场成像,主要采用附加校正镜组的方法,即在次镜之后添加折射透镜并对大视场像差进行补偿,可以达到大视场成像的目的^[6-8]。但是这种附加透镜的方法会使系统变得更复杂,无热化难度增加,工作波段受限,不利于实现系统的小型化和轻量化。近年来,科研人员提出了将光学技术与图像复原技术相结合的设计思想,这为许多现有难题提供了解决方案。谢丁杰等^[9]利用了点扩展函数(PSF)对退化图像进行复原,降低了卡塞格林光学系统的中心遮拦对中频段调制传递函数的影响。Zhang 等^[10]采用了跨通道反卷积的方法来消除简易光学系统的色差。Hu 等^[11]提出了受衍射效率影响的 PSF 模型,使用该模型可以解决衍射元件非中心波长处衍射效率下降的问题。

本文提出一种间接成像方法以实现 R-C 光学系统的大视场成像。首先对 R-C 光学系统的像差进行分析,得到全视场范围内的像差变化规律;然后根据各像差变化规律,基于波前像差理论和 Zernike 多项式提出波前像差推算公式并建立波前像差模型,进而构建广义光瞳函数;接着对广义光瞳函数进行傅里叶变换,取变换结果实部的平方得到 PSF 并建立 PSF 模型;最后采用反卷积算法并结合 PSF 模型处理图像,最终消除大视场像差造成的模糊现象。采用该方法对 R-C 系统进行仿真模拟。仿真结果表明,处理后的各视场调制传递函数值均显著提升,图像质量明显改善。

2 基本原理

光学系统的成像图像是由清晰图像与系统 PSF 卷积后再与噪声进行加和得到的^[12-14],表达式为

$$g(x, y) = x_{\text{PSF}}(x, y) \otimes f(x, y) + \eta(x, y), \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 表示探测器接收到的模糊图像; $x_{\text{PSF}}(x, y)$ 表示光学系统的 PSF; $f(x, y)$ 表示清晰图像,其是未知的; $\eta(x, y)$ 表示噪声; \otimes 表示卷积符号; (x, y) 表示图像坐标。在已知 $g(x, y)$ 和 $x_{\text{PSF}}(x, y)$ 的情况下,对噪声进行一定的抑制,再使用(1)式可以求取 $f(x, y)$ 的最优解,即 $f'(x, y)$,

从而得到清晰图像。根据这种间接成像的原理,能够实现大视场 R-C 光学系统的清晰成像。

R-C 光学系统是一种反射式结构,因此该系统没有色差。R-C 光学系统中主、次镜的圆锥系数^[15]可表示为

$$k_1 = -1 - \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (2)$$

$$k_2 = -\frac{2\beta/(1-\alpha) + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}, \quad (3)$$

式中: k_1 和 k_2 分别表示主、次镜的圆锥系数; α 表示系统的遮拦比; β 表示次镜的放大倍率。利用主、次镜的圆锥系数可以校正球差和彗差,因此影响 R-C 光学系统成像质量的主要像差为像散,场曲次之,两者与像高的平方成正比。对于较小 F 数的光学系统来说,还应考虑高级像差。

R-C 光学系统的 PSF 可采用光线追迹的方法得到,将光束分解成大量光线并从物面开始追迹,通过光学系统后最终到达像面。为了方便且快速地计算光学系统的 PSF,可利用 Zernike 多项式、波前像差和广义光瞳函数来构建 PSF 模型,该方法与光线追迹方法相比,可以提高 PSF 的获取速度,并且考虑衍射对成像的影响。

Zernike 多项式与像差具有对应关系,前 9 项 Zernike 多项式及对应像差如表 1 所示^[16-17],其中 R 和 θ 分别表示极坐标系下的极径和极角。

表 1 Zernike 多项式与像差的对应关系

Table 1 Correspondence between Zernike polynomials and aberrations

Term	Zernike polynomial	Name
Z_0^0	1	Displacement
Z_1^1	$R \cos \theta$	X-tilt
Z_1^{-1}	$R \sin \theta$	Y-tilt
Z_2^0	$2R^2 - 1$	Defocus
Z_2^2	$R^2 \cos 2\theta$	0° astigmatism
Z_2^{-2}	$R^2 \sin 2\theta$	45° astigmatism
Z_3^1	$(3R^3 - 2R) \cos \theta$	X-coma
Z_3^{-1}	$(3R^3 - 2R) \sin \theta$	Y-coma
Z_4^0	$6R^4 - 6R^2 + 1$	Spherical aberration

Zernike 多项式可以表示光学系统的波前像差,较小 F 数的 R-C 系统在 Y 视场方向的波前像差可表示为

$$W_Y(x, y) = A_1 Z_0^0 + A_3 Z_1^{-1} + A_4 Z_2^0 + A_5 Z_2^2 + \sum_j A_j Z_j, \quad (4)$$

式中: A_1 、 A_3 、 A_4 和 A_5 表示各 Zernike 项的系数; Z_0^0 表示平移项,不对应像差; Z_1^{-1} 和 Z_2^0 分别表示在

Y 方向的倾斜和离焦项,场曲的存在会导致一定的倾斜和轴外离焦,因此(4)式包含 Z_1^{-1} 和 Z_2^0 ; Z_2^2 表示 0° 像散项; $\sum_j A_j Z_j$ 表示波前像差的补偿项,其中 j 为 Zernike 多项式的序号,当系统 F 数较小时,该项代表高级像差的波前。

为了推算 A_1 、 A_3 、 A_4 和 A_5 值的变化情况,在 Y 视场方向上进行等间距采样,将采样点 Q 的波前按 Zernike 多项式进行拟合,得到的拟合系数分别为 $A_{1,Q}$ 、 $A_{3,Q}$ 、 $A_{4,Q}$ 和 $A_{5,Q}$ 。由于像散和场曲与像高的平方成正比,因此对应的 Zernike 项的系数 A_1 、 A_3 、 A_4 和 A_5 也与像高的平方成正比。结合二次拉格朗日插值公式,可以得到 R-C 光学系统在光瞳处 Zernike 项系数的推算公式,可表示为

$$A_i = A_{i,Q-1} \frac{(h - h_Q)(h - h_{Q+1})}{(h_{Q-1} - h_Q)(h_{Q-1} - h_{Q+1})} + A_{i,Q} \frac{(h - h_{Q-1})(h - h_{Q+1})}{(h_Q - h_{Q-1})(h_Q - h_{Q+1})} + A_{i,Q+1} \frac{(h - h_{Q-1})(h - h_Q)}{(h_{Q+1} - h_{Q-1})(h_{Q+1} - h_Q)}, \quad (5)$$

式中: $i=1, 3, 4, 5$; h 表示推算点的像高; h_Q 表示采样点 Q 的像高。

使用由(4)式推导出的波前像差可构建 Y 视场方向的广义光瞳函数 $P_Y(x, y)$, 表达式为

$$P_Y(x, y) = p(x, y) \exp[ik W_Y(x, y)], \quad (6)$$

式中: k 表示波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长; $p(x, y)$ 表示光瞳函数。

对 $P_Y(x, y)$ 进行傅里叶变换处理,取变换结果实部的平方得到 Y 视场方向的 PSF, 表达式为

$$F_{\text{PSF},Y}(x, y) = |F[P_Y(x, y)]|^2, \quad (7)$$

式中: F 表示傅里叶变换。

R-C 光学系统是一种共轴对称式光学系统,该系统的 PSF 关于光轴对称,因此全视场内的 PSF 可由 Y 方向的 PSF 经过旋转得到,表达式为

$$x_{\text{PSF}} = \text{Rotate}\{F_{\text{PSF},Y}, \gamma\}, \quad (8)$$

式中: γ 表示视场内任一推算点到轴上点的连线与 Y 轴的夹角; $\text{Rotate}\{\cdot\}$ 表示旋转函数。根据 R-C 光学系统的 PSF 关于光轴对称的特性,操作过程中可以减少工作量,提高构建速度。

最后根据构建的 PSF 模型,采用空间变化图像约束的最小二乘复原方法^[18-19]和乘子交替方向法^[20]计算最优近似解,从而完成图像复原。间接成像方法的流程如图 1 所示。

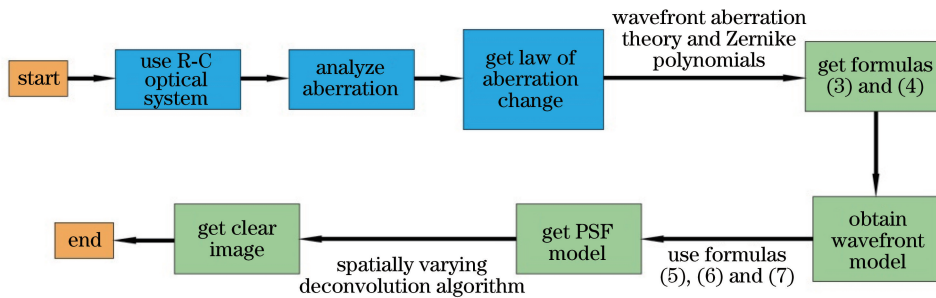


图 1 间接成像方法的流程

Fig. 1 Flowchart of indirect imaging method

3 设计实例

3.1 光学系统设计

使用型号为 1280JSX 的短波红外探测器,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $12.5 \mu\text{m}$ 。R-C 光学系统的指标参数如表 2 所示,结构如图 2 所示,各视场点列图如图 3 所示。

表 2 系统的指标参数

Table 2 Index parameters of system

Parameter	Content
F-number	4
Focal length /mm	1300
Field of view /($^\circ$)	0.9
Wavelength /nm	900-1700

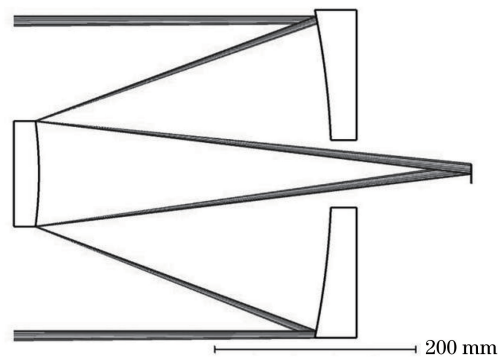


图 2 光学系统的结构

Fig. 2 Structure of optical system

从图 3 可以看到,影响 R-C 系统轴外成像质量的像差主要为像散。从图 3(d)可以看到,弥散斑下

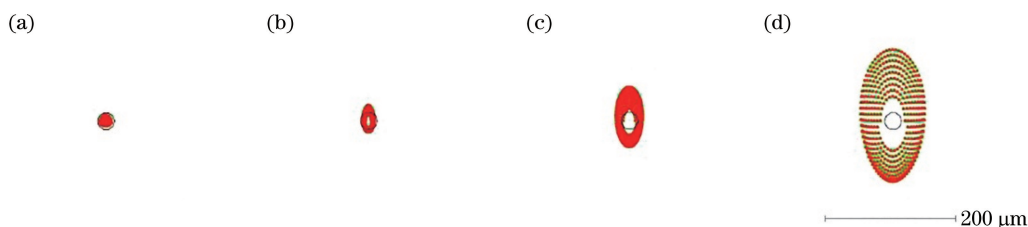


图 3 R-C 系统在不同角度下的点列图。(a) 0°; (b) 0.225°; (c) 0.315°; (d) 0.450°

Fig. 3 Point diagram of R-C system at different angles. (a) 0°; (b) 0.225°; (c) 0.315°; (d) 0.450°

方的点列分布明显更密集,因此还应考虑其他像差的影响。

3.2 建立 PSF 模型

由于 R-C 系统的 F 数较小,所以高级像差对 PSF 产生无法忽略的影响,因此当表示 R-C 系统的波前像差时,应将(4)式的波前像差补偿项按照实际的 Zernike 多项式拟合情况,选择恰当的 Zernike 项作为补偿项。前 9 项 Zernike 多项式拟合 R-C 系统 Y 方向波前像差的结果如图 4 所示。

因 Z_2 、 Z_6 和 Z_7 项的拟合系数为 0,因此在图 4 中并未给出。从图 4 可以看到,将 A_8Z_8 和 A_9Z_9 作为波前像差的补偿项,可以更为精确地表示 R-C 系统的波前像差。

为了获取连续的波前像差模型,根据图 4 的拟合数据并使用(5)式来推算各 Zernike 项系数的变

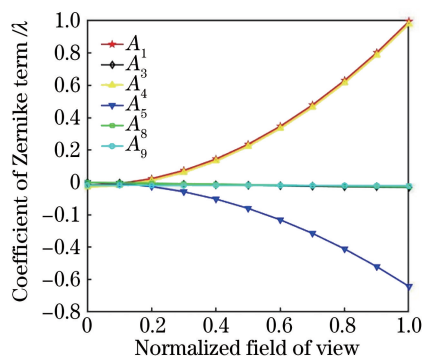


图 4 Zernike 多项式的拟合结果

Fig. 4 Fitting results of Zernike polynomials

化规律,最后使用(4)式来建立波前像差模型。抽取 0.12°、0.22°、0.34° 和 0.45° 4 个视场,将使用 ZEMAX 软件计算得到的波前和所构建模型的波前进行对比,结果如图 5 所示。

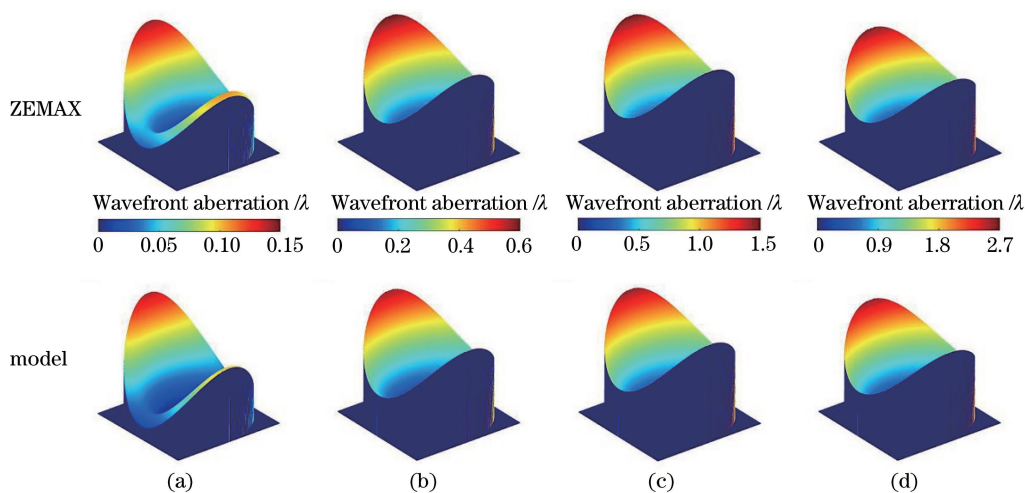


图 5 R-C 系统在不同视场下的波前对比。(a) 0.12°; (b) 0.22°; (c) 0.34°; (d) 0.45°

Fig. 5 Wavefront comparison of R-C systems at different fields of view.

(a) 0.12°; (b) 0.22°; (c) 0.34°; (d) 0.45°

首先将波前像差模型代入(6)式以得到广义光瞳函数,然后对广义光瞳函数使用(7)式和(8)式进行变换,最终得到 PSF 模型。抽取 0.15°、0.30° 和 0.45° 三个视场,将使用 ZEMAX 软件计算得到的 PSF 与模型的 PSF 进行对比,结果如图 6 所示。

4 复原结果及分析

结合 3.2 节计算的 PSF 模型,对探测器接收到的模糊图像采用空变反卷积算法进行复原,处理前后的结果对比如图 7 和图 8 所示。

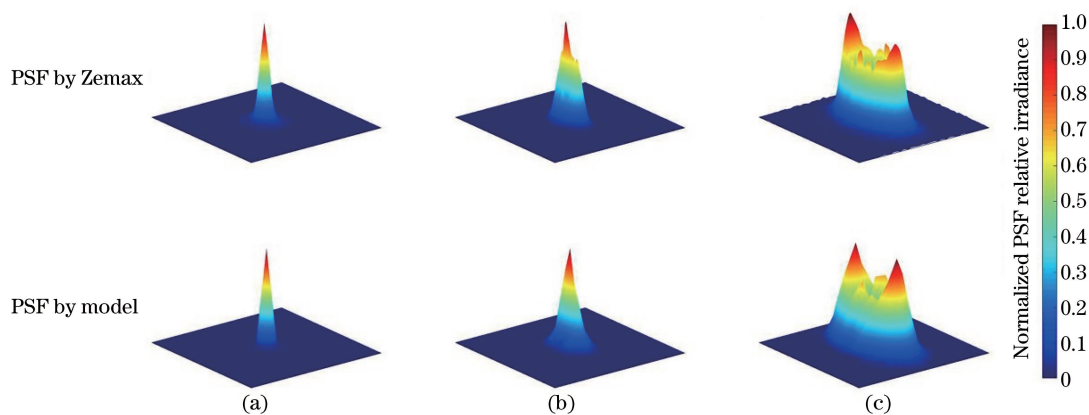


图 6 R-C 系统在不同视场下的 PSF 对比。(a) 0.15° ; (b) 0.30° ; (c) 0.45°

Fig. 6 PSF comparison of R-C system in different fields of view. (a) 0.15° ; (b) 0.30° ; (c) 0.45°

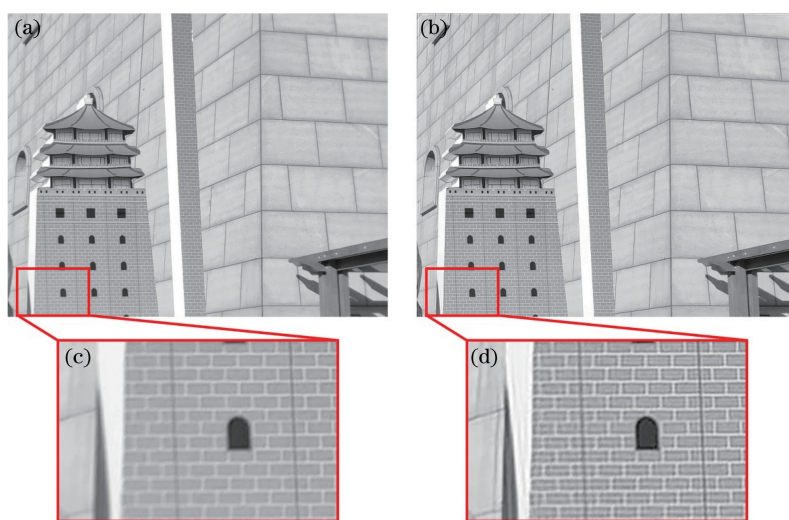


图 7 复原前后的结果对比。(a)复原前图像;(b)复原后图像;(c)图(a)的局部放大图;(d)图(b)的局部放大图

Fig. 7 Comparison of results before and after restoration. (a) Image of before restoration; (b) image of after restoration; (c) local enlarged view of Fig. (a); (d) local enlarged view of Fig. (b)

图 7 的原图是由作者拍摄而得的,经过仿真模拟后得到图 7(a)。从图 7 可以看到,复原后图像的清晰度有所上升,物体边缘轮廓变得更加分明,“网格”更清晰,对比度明显提升,说明所提方法能够提升大视场 R-C 系统的成像质量。

图 8 为截取部分 ISO12233 型分辨率板的测试结果。从图 8 可以看到,复原后分辨率板的分辨率明显提升,而且条纹的对比度更好,成像更清晰。为了从光学角度客观地评价大视场 R-C 系统间接成像的质量,对图 8 中方框区域采用斜边法^[21]来测量调制传递函数(MTF),测量结果如图 9 所示。

从图 9 可以看到,复原后各区域的 MTF 值整体增大,在空间频率为 40 cycle/mm 处的 MTF 平均提升约为 0.25;其中区域 1 靠近像面中心,像差对成像质量造成的影响很小,而 PSF 主要受到孔径

衍射的影响,由于 PSF 模型的构建考虑衍射,所以复原后能够在一定程度上降低衍射对成像造成的模糊,因此区域 1 在空间频率为 40 cycle/mm 处的 MTF 值提升约为 0.20;区域 2 的 PSF 同时受到像差和衍射的影响,但像差较小,PSF 的能量分布较为集中,在复原图像的同时可以降低像差和衍射对成像质量造成的影响,因此复原后在空间频率为 40 cycle/mm 处的 MTF 值提升约为 0.34,复原效果最为明显;区域 3 的 PSF 主要受到像散的影响,所以 PSF 的分布范围变大,集中度下降,简单的复原会出现振铃的现象,因此后期使用复原评价函数中的平滑项用以抑制振铃,图 8 中区域 3 复原后并未出现振铃的现象,说明振铃的抑制效果显著;区域 3 的 MTF 在空间频率为 40 cycle/mm 处的 MTF 值提升约为 0.33;随着视场的增大,复原前区域 4

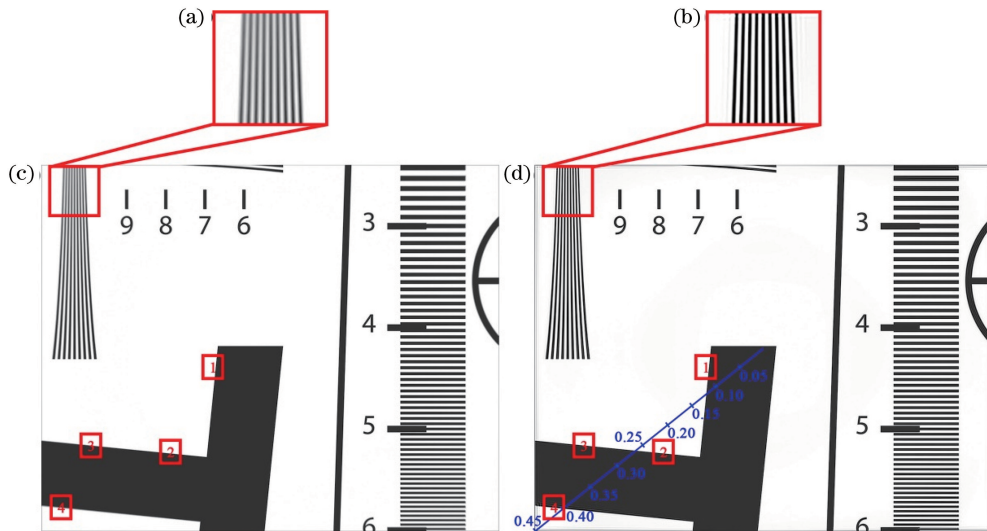


图 8 分辨率板复原前后的结果对比。(a)图(c)的局部放大图;(b)图(d)的局部放大图;(c)复原前图像;(d)复原后图像

Fig. 8 Comparison of results before and after restoration of resolution plate. (a) Local enlarged view of Fig. (c); (b) local enlarged view of Fig. (d); (c) image of before restoration; (d) image of after restoration

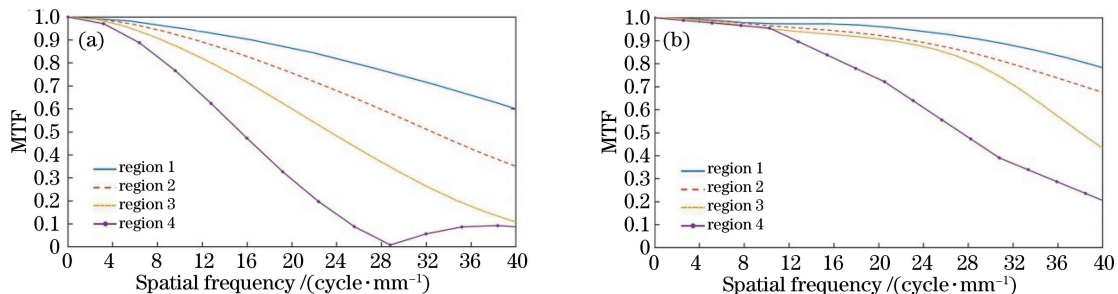


图 9 复原前后的 MTF 对比曲线。(a)复原前;(b)复原后

Fig. 9 MTF comparison curves before and after restoration. (a) Before restoration; (b) after restoration

的 MTF 出现下降到 0 后反弹的现象,表明区域 4 的频率大于 28 cycle/mm 之后是伪分辨,使用简单的反卷积复原已经不能恢复出正确的图像,因此采用基于每个像元的空间变化反卷积算法并结合 PSF 模型提供的信息,能够复原出正确的图像。区域 4 复原后出现振铃的现象且 MTF 值提升较小的原因:区域 4 距离像面中心最远,该视场范围对应的所组成的 PSF 所组成的矩阵大,这会加重振铃现象;R-C 系统的像差主要是像散,而且次镜会遮挡中心光束,这将导致 PSF 的能量主要分布在外围,这种能量不集中的情况也会加重振铃现象。上述两种情况均会降低振铃现象的抑制效果,但此时区域 4 的 MTF 与处理之前相比仍然具有一定的提升。

5 结 论

提出一种实现 R-C 光学系统大视场成像的方法。首先分析 R-C 系统的像差特性,然后基于波前像差理论和 Zernike 多项式来构建 PSF 模型,最后

采用反卷积算法来提高大视场 R-C 系统的成像质量。与传统附加光学元件实现大视场成像的方法相比,所提方法仅采用主、次镜,具有结构紧凑、质量轻、工作波段宽和易于实现无热化的优点。对焦距为 1300 mm、全视场为 0.9° 和 F 数为 4 的 R-C 光学系统进行仿真模拟。仿真结果表明,在空间频率为 40 cycle/mm 处平均提升约为 0.25,说明该方法能够有效地提升大视场 R-C 系统的成像质量。

参 考 文 献

- [1] Pan J H. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope Cassegrain focus [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 231-234.
潘君骅. 关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 231-234.
- [2] Wang Z L, Zhang W, Long F N. Image quality evaluation for diffraction-limited optical synthetic aperture system [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25

- (1): 35-39.
王治乐, 张伟, 龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 35-39.
- [3] Yuan Y H. The research for small-sized reflecting/catadioptric telescope [D]. Suzhou: Soochow University, 2011: 1-6.
袁颖华. 小型反射/折反射式望远镜的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 1-6.
- [4] Smith W J. Modern optical engineering[M]. 4th ed. New York: McGrawHill, 2008: 503-512.
- [5] Pan J H. New pan-Cassegrain telescope system[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(5): 438-441.
潘君骅. 一个新的泛卡塞格林望远镜系统[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 438-441.
- [6] Malacara D, Malacara Z. Handbook of optical design [M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 2004: 384-395.
- [7] Wynne C G. Field correctors for large telescopes[J]. Applied Optics, 1965, 4(9): 1185-1192.
- [8] Wynne C G. Field correctors for very large telescopes [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996, 280(2): 555-558.
- [9] Xie D J, Li T C, Feng H J, et al. Image restoration of cassegrain optical remote sensing system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0611004.
谢丁杰, 李铁成, 冯华君, 等. 卡塞格林光学遥感系统的图像复原[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0611004.
- [10] Zhang J G, Nie Y F, Fu Q, et al. Optical-digital joint design of refractive telescope using chromatic priors[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(5): 052201.
- [11] Hu Y, Cui Q F, Zhao L D, et al. PSF model for diffractive optical elements with improved imaging performance in dual-waveband infrared systems [J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26845-26857.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2008: 196-198.
- [13] Wu Q, Gao K, Zhang Z Z, et al. Reconstruction of variable exponential regularization for wide-field polarization-modulated imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111025.
吴穹, 高昆, 张震洲, 等. 宽视场偏振调制成像的变指数正则化重构方法[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111025.
- [14] Hu Y, Cui Q F, Sun L, et al. Optical-digital joint design of a dual-waveband infrared refractive-diffractive system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1422002.
胡洋, 崔庆丰, 孙林, 等. 红外双波段折衍混合光学-数字联合系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1422002.
- [15] Pan J H. Fabrication and testing of optical asphere [M]. Beijing: Science Press, 1994: 11-21.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 11-21.
- [16] Zhao C Z, Cui Q F, Zhao Y M, et al. Design of fuselage conformal optical system based on freeform correctors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022010.
赵春竹, 崔庆丰, 赵渊明, 等. 基于自由曲面校正器的机身共形光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022010.
- [17] Zheng H Q, Cui Q F, Hu Y, et al. Method for expanding field-of-view of cassegrain system with computational imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1522001.
郑汉青, 崔庆丰, 胡洋, 等. 用计算成像扩大卡塞格林系统视场的方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1522001.
- [18] Zhou C H, Wang Z L, Liu S K. Method of image restoration directly based on spatial varied point spread function [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0110001.
周程灏, 王治乐, 刘尚阔. 基于空间变化点扩展函数的图像直接复原方法[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0110001.
- [19] Sroubek F, Kamenicky J, Lu Y M. Decomposition of space-variant blur in image deconvolution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2016, 23(3): 346-350.
- [20] Müller P, Lehmann M, Braun A. Optical quality metrics for image restoration [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11062: 1106214.
- [21] Li T C, Tao X P, Feng H J, et al. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897.