

文章编号 1004-924X(2016)01-0007-07

宽谱段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统

常 军^{1*}, 沈本兰¹, 王 希¹, 张 柯^{1,2}, 牛亚军¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国北方车辆研究所, 北京 100081)

摘要:为了实现无遮拦、宽谱段、动态的局部高分辨成像,设计了一种局部高分辨率的离轴主动反射变焦系统。该系统将离轴主动反射式变焦理论和局部动态高分辨率成像理论相结合,实现了宽谱段范围内不同焦距处的动态局部高分辨成像。采用曲率半径可变的变形镜实现变焦,避免了传统机械变焦中复杂的机械运动控制,减轻了系统体积和重量并有效地保证了系统的宽谱段和大视场;通过对变形镜面形的控制,在不同焦距处实现了全视场内任意感兴趣区域的局部高分辨成像,降低了数据传输量;而采用无色差的反射式系统则克服了传统透射式及折反射式系统只能实现单色局部高分辨成像的缺点。经过优化设计,系统在可见光范围内成像,焦距 f' 为 75 mm(视场角 FOV 为 $x:0^\circ\sim 0.5^\circ$, $y:3^\circ\sim 10^\circ$)~150 mm(FOV 为 $x:0^\circ\sim 0.5^\circ$, $y:1.7^\circ\sim 5^\circ$), $F/\#$ 为 7~14。理论和仿真分析表明,系统在各焦距处感兴趣区域内的成像质量均可达到衍射极限,实现了全视场内任意区域动态局部高分辨的成像效果。

关键词:光学系统设计;离轴反射变焦系统;局部高分辨成像;主动光学;变形镜

中图分类号:O435; TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0007

Off-axis reflective active zoom system with broad spectrum and dynamic local high-resolution

CHANG Jun^{1*}, SHEN Ben-lan¹, WANG Xi¹, ZHANG Ke^{1,2}, NIU Ya-jun¹

(1. School of Opto-electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: bitchang@bit.edu.cn

Abstract: To realize a broad spectrum and dynamic local high-resolution imaging, an off-axis reflective active zoom system is designed. This system combines off-axis reflective active zoom theory and local high-resolution theory together and realizes dynamic variable resolution in different focal lengths. Deformable mirrors (DMs) with variable curvature radii are used to change focal length to avoid complicated mechanical zoom movement control in a traditional system to reduce the volume and weight and to guarantee the broad spectrum of optical system. Through the control of deformable mirrors at different focal lengths, high-resolution within the Region of Interest(ROI) is achieved and the amount of data transmission is reduced. Moreover, as reflective systems have no chromatic aberration, it overcomes the disadvantages of monochrome imaging of traditional local high-resolution systems. After optimization, the imaging spectrum is visible light, the focal length ranges from

收稿日期:2015-09-28;修订日期:2015-11-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61178041);预研基金(No. 201511340836)

75 mm(Field of View(FOV) $x:0^\circ-0.5^\circ, y:3^\circ-10^\circ$)—150 mm(FOV $x:0^\circ-0.5^\circ, y:1.7^\circ-5^\circ$), the $F/\#$ is 7—14. The result of theoretical and simulation analysis indicates that the imaging quality of the ROI reaches the diffraction limit, and the system realizes dynamic local high-resolution in the FOV.

Key words: optical system design; off axis reflective zoom system; local high-resolution imaging; active optics; deformable mirror

1 引言

近年来,如何实现宽谱段、可变焦、低数据传输量的成像成为目标追踪、监控、探测等领域的重点方向。反射变焦系统由于具有宽谱段、结构紧凑、易轻量化等特点而受到越来越广泛的重视^[1]。传统的机械反射变焦系统由于存在机械结构,通常需要花费数百毫秒实现变焦^[2],机械运动复杂^[3]、系统体积大^[4-5]、响应速度慢,因而其应用范围受到一定的限制。主动反射变焦系统是随着变形镜(Deformable Mirror, DM)、空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)和液体透镜等主动光学元件的发展而发展起来的。该系统通过控制主动光学元件的曲率、折射率等的变化来实现系统光焦度的改变。2009年,德国夫琅和费光子微系统研究所的 Kristof Seidl 等人设计出一种由 4 面反射镜组成的离轴主动反射变焦系统,其中第一片和第四片镜为 DM,并搭建了实验原理样机^[6]。2013年,西安光学精密机械研究所的赵惠等人设计了一个具有四反射镜的主动变焦系统^[7],其中主镜为两片曲率不同的反射镜,第三镜为 DM,变焦比为 4(48~192 mm),并制作了原理样机。2014年,北京理工大学的沈本兰等人设计了一个离轴三反射主动变焦系统,其中主镜为固定镜面,次镜和三镜为 DM^[8]。

然而,主动反射变焦系统依然存在某些限制。第一,由于共轴反射变焦系统存在遮拦,通常对系统进行离轴设计,因此会引入大量非对称像差。此外,系统中固定元件的表面面形复杂,加工检测精度要求高,实现全视场高分辨率成像的难度较大^[9-12];第二,在全视场内实现高分辨成像,系统设计难度大、结构复杂、成本较高;第三,在远程遥感等领域,对数据传输速度有着较高的要求,全视

场的高分辨率成像会增加数据传输量,降低传输速度。而局部高分辨成像只校正感兴趣区域(Region of Interest, ROI)的像差,实现清晰成像,其他区域的成像质量较低,系统结构相对简单、设计难度低、体积小、质量轻且数据传输量小。2002年,美国的 D. Wick 等人利用反射式 SLM 设计了一个局部高分辨成像系统,并进行了实验验证^[13]。但由于 SLM 只能调制单色偏振光,系统的光能利用率低、成像谱段窄,因此其使用受到了一定限制。2011年,西安光机所的胡少磊等人设了一个 4 反射共轴主动变焦系统,突破了单色偏振光成像的限制,系统可以在 $f' = -558.6$ mm 任意视场角进行变焦。但该系统采用双卡塞格林结构,存在较大的视场遮拦^[14]。

本文提出了一种基于 DM 的宽谱段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统。首先从矩阵光学出发,分析了主动反射变焦系统的成像理论。该系统采用全动型设计,增加了系统自由度,并进行了离轴设计。利用 DM 对各变焦位置任意视场角内的波像差进行校正,均能实现局部高分辨成像,大大降低了数据传输量和系统的复杂程度。其成像谱段为可见光,在各 ROI 内的成像质量均能达到衍射极限,像面保持一致,成像质量满足设计指标。

2 主动变焦系统成像理论分析

为实现系统的主动变焦,本文选用三反射镜的结构形式,如图 1 所示。系统由主镜 M_1 、次镜 M_2 及三镜 M_3 组成,图中正负透镜仅为示意,不代表实际光焦度的正负。其中 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 分别代表三个反射镜的光焦度, d_1, d_2 代表透镜间隔, l'_3 代表系统的后截距。

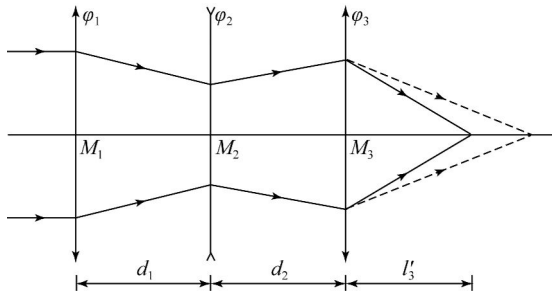


图 1 三反射变焦系统的结构形式

Fig. 1 Scheme of three-mirror zoom system

根据矩阵光学理论,三个反射镜的光学变换矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_2 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

两镜之间的光学过渡矩阵可表示为:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_2 = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

因此整个系统的光学变换矩阵可表示为:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \mathbf{M}_3 \mathbf{T}_2 \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

推导可得系统的组合焦距及后截距分别为:

$$F' = -1/(-\varphi_3 - (-\varphi_3 d_2 + 1)\varphi_2 - ((-\varphi_3 - (-\varphi_3 d_2 + 1)\varphi_2)d_1 - \varphi_3 d_2 + 1)\varphi_1), \quad (4)$$

$$l'_3 = F'(1 - d_2 \varphi_2 - ((1 - d_2 \varphi_2)d_1 + d_2)\varphi_1). \quad (5)$$

在主动反射变焦系统中,光学元件之间的间

隔 d_1, d_2 以及后截距 l'_3 均保持不变,仅各镜的光焦度 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 发生改变。根据式(4)和式(5),结合三阶像差理论,即可得到三反射主动变焦系统的初始结构。通过选取适当的偏心和倾斜量,即可得到离轴反射变焦系统的初始结构。

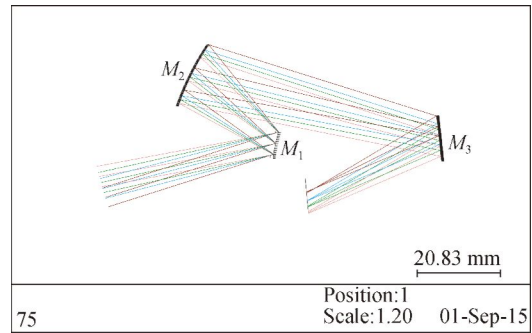
离轴主动反射变焦系统的设计参数为:

焦距: $f' = 75 \sim 150$ mm;

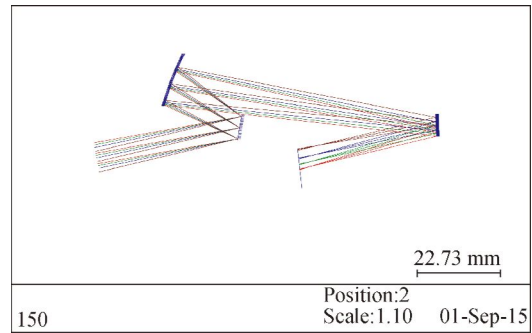
视场角: $FOV = 10^\circ \sim 3^\circ$;

成像波段:可见光。

对系统进行初步优化后得到的结构图如图 2 所示,结构参数如表 1 所示。



(a) $f'_1 = 75$ mm



(b) $f'_2 = 150$ mm

图 2 离轴主动反射变焦系统结构图

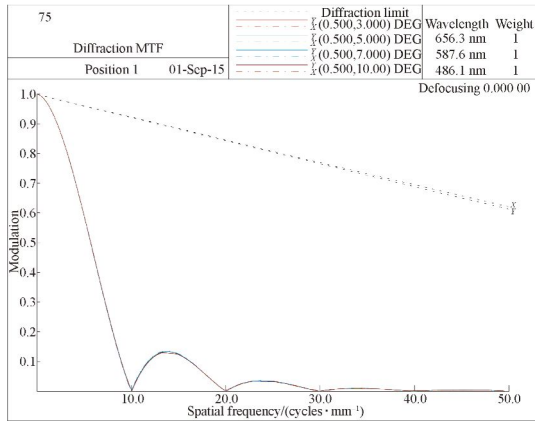
Fig. 2 Layout of off-axis reflective active zoom system

表 1 离轴主动反射变焦系统的结构参数

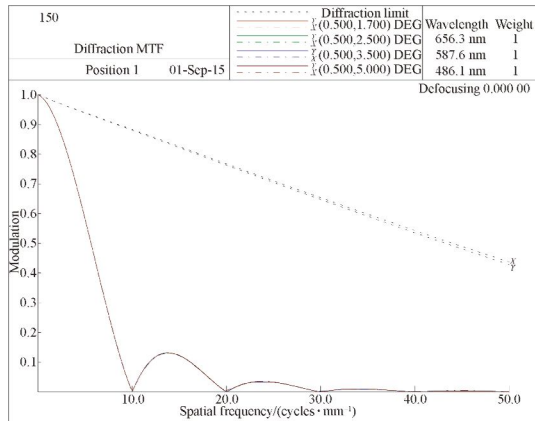
Tab. 1 Structural parameters of off-axis reflective active zoom system

	半径 r /mm	间隔 d /mm	Conic 系数	偏心量 y /mm	倾斜量 $x/(\circ)$
主镜 (光阑)	104.863 8	-32.372 7	-3.638 5	0	-6.874 6
	108.934 4		-3.503 8		
次镜	112.546 4	109.346 7	0.335 1	-5.397 5	-3.000 0
	109.697 5		0.379 4		
三镜	-1 087.312 0	-17.213 8	-4.235 6	-4.372 8	-2.982 5
	189.144 1		1.763 8		

系统各表面均为二次曲面系数,且系数较小。此时系统的 MTF 如图 3 所示,点列图如图 4 所示。



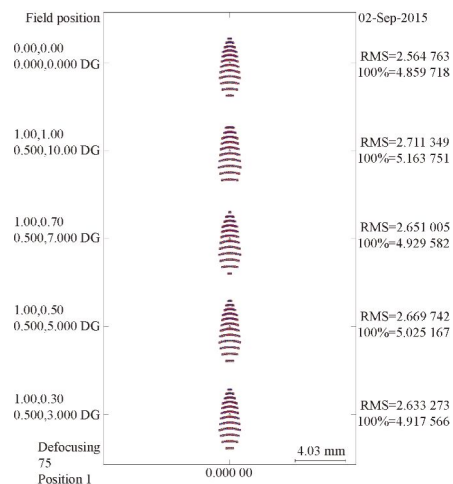
(a) $f_1' = 75$ mm



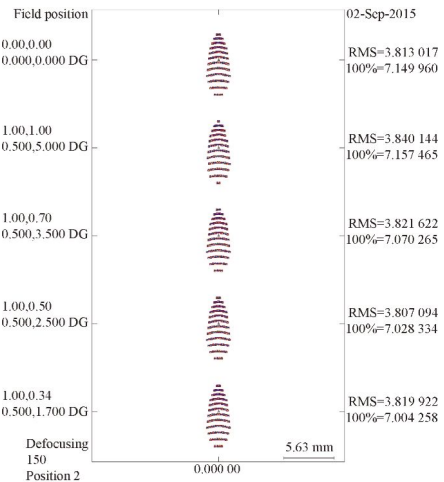
(b) $f_2' = 150$ mm

图 3 离轴主动反射变焦系统的 MTF

Fig. 3 MTFs of off-axis reflective active zoom system



(a) $f_1' = 75$ mm



(b) $f_2' = 150$ mm

图 4 离轴主动反射变焦系统的点列图

Fig. 4 Spot diagrams of off-axis reflective active zoom system

由图 3 和图 4 可知,未进行局部高分辨设计时,系统不存在色差,但存在较大的彗差和像散,成像质量较差。

3 局部高分辨主动反射变焦系统设计及其像质分析

主动反射变焦系统的核心器件是主动光学元件,如 DM、SLM 及液体透镜等。其中,DM 通过致动器控制表面面形变化,最早在自适应光学领域用于校正大气湍流对光学系统像质的影响,对复杂面形的拟合度好、响应速率高,且不存在色差,因而在空间遥感、天文观测等领域得到了广泛应用。这里采用 DM 实现了局部高分辨与离轴主动反射变焦的结合。

本文在图 2 的主动反射变焦系统的基础上进行了局部高分辨设计。在 Code V 软件中可以获得用于拟合 ROI 像差的前 36 阶 Zernike 多项式的系数,在主镜 M_1 的面形上叠加 Zernike 项进行像差校正^[15]。Zernike 多项式的表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{[1 - (1 + k)c^2r^2]}} + \sum_{j=1}^n C_{j+1} Z_j, \quad (6)$$

式中: z 为元件表面某点处的矢高, c 为表面顶点的曲率, k 为表面的 conic 系数, Z_j 为第 j 阶 Zernike 项, C_{j+1} 为 Z_j 的系数, r^2 为表面某点到原

点的距离。

利用 Zernike 多项式分别校正了 75 mm 焦距处 0.3, 0.7, 1 视场和 150 mm 焦距处 0.3, 0.7, 1 视场。表 2 给出了 $f'_1=75$ mm 时(0.5°, 10°)视场进行校正后,在主镜 M_1 上施加的用来校正像差的 Zernike 各阶系数。校正后的 MTF 及点列图如图 5~图 8 所示。

从图 5~图 8 可知,像差校正后各 ROI 的 MTF 在 50 lp/mm 处均能达到衍射极限,其他视场在 10 lp/mm 时已达到截止频率;从点列图可知,各 ROI 区域的点列图均小于艾里斑,其他区域则存在较大的像差,成像质量较差。由此实现了不同放大倍率、不同视场的动态局部高分辨成像。

表 2 $f'_1=75$ mm 时(0.5°, 10°)视场用来校正像差的 Zernike 多项式各阶系数

Tab. 2 Parameters of Zernike polynomial at $f'_1=75$ mm, FOV=(0.5°, 10°)

Zernike 项 Z_j	系数 C_{j+1}	Zernike 项 Z_j	系数 C_{j+1}	Zernike 项 Z_j	系数 C_{j+1}	Zernike 项 Z_j	系数 C_{j+1}
1	1.600 32	10	-4.07E-7	19	-8.77E-9	28	-1.38E-8
2	-0.010 83	11	1.25E-5	20	1.39E-7	29	-3.21E-12
3	-0.054 67	12	5.74E-6	21	2.94E-5	30	-8.54E-8
4	0.000 895	13	-2.43E-6	22	-1.44E-11	31	-1.32E-10
5	-0.000 3	14	-3.21E-7	23	-2.72E-9	32	-7.22E-11
6	2.35E-4	15	-3.79E-6	24	4.17E-10	33	1.21E-11
7	1.40E-4	16	-3.34E-8	25	3.67E-2	34	-1.57E-9
8	4.51E-5	17	-5.01E-7	26	4.21E-5	35	2.66E-9
9	2.88E-3	18	-2.81E-9	27	2.20E-11	36	2.11E-9

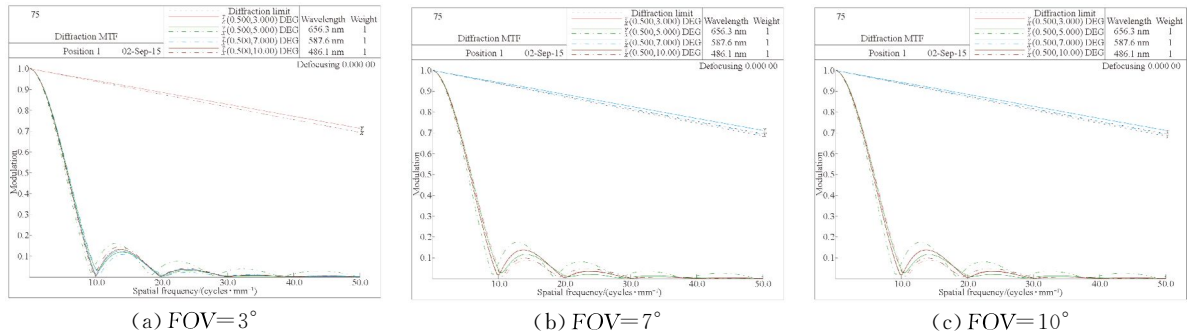


图 5 $f'_1=75$ mm 时像差校正后系统的 MTF

Fig. 5 MTFs at $f'_1=75$ mm after aberration correction

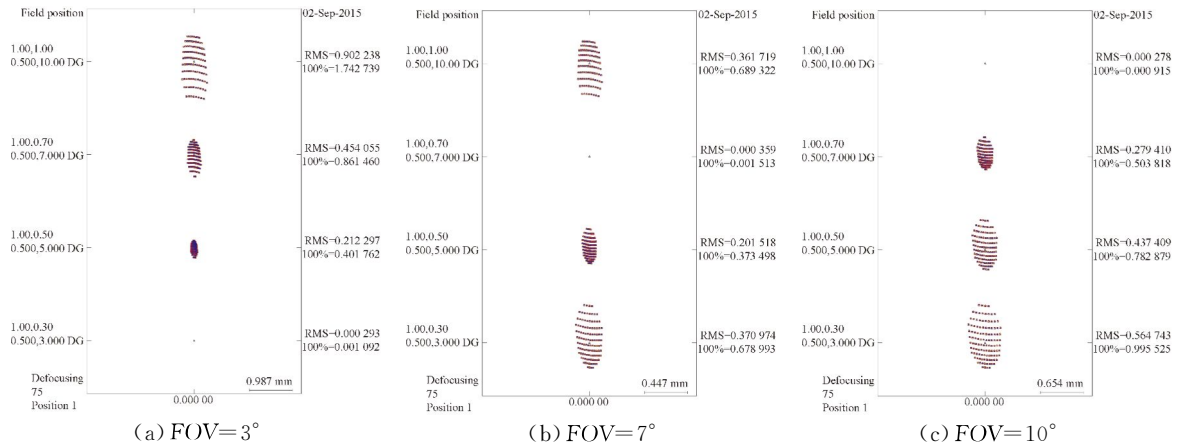


图 6 $f'_1=75$ mm 时像差校正后系统的点列图

Fig. 6 Spot diagrams at $f'_1=75$ mm after aberration correction

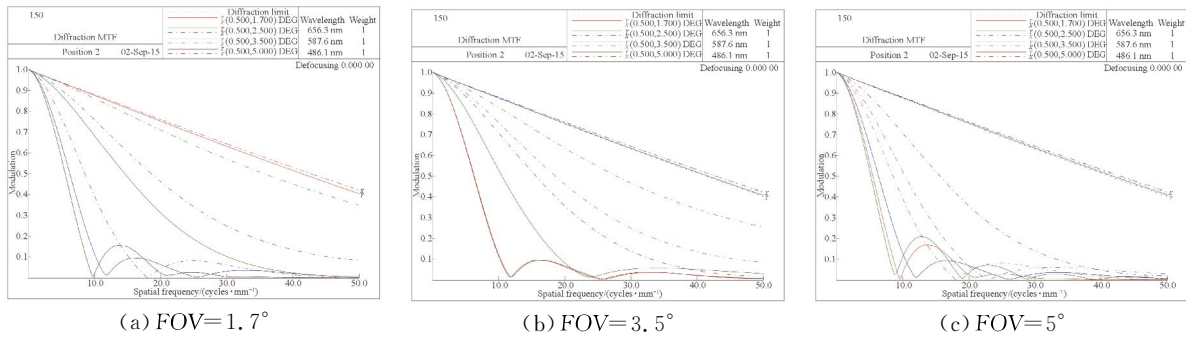


图 7 $f_2' = 150$ mm 时像差校正后系统的 MTF
Fig. 7 MTFs at $f_2' = 150$ mm after aberration correction

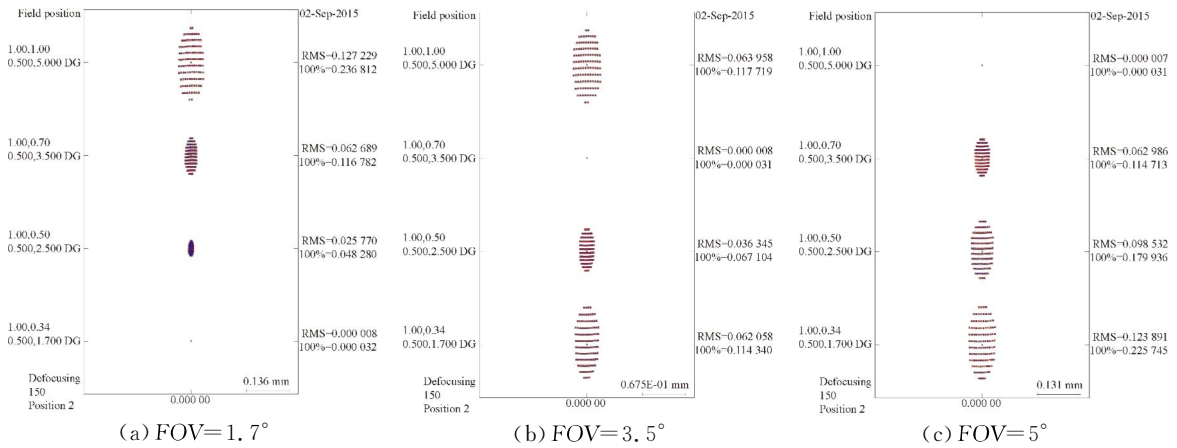


图 8 $f_2' = 150$ mm 时像差校正后系统的点列图
Fig. 8 Spot diagrams at $f_2' = 150$ mm after aberration correction

4 结 论

本文针对传统主动反射变焦和局部高分辨系统的应用限制,提出了一种宽波段、动态局部高分辨的离轴主动反射变焦系统。系统避免了复杂的机械结构,便于小型化和轻便化,同时具有宽波段成像的特点。离轴系统则避免了同轴反射系统存

在的遮拦问题,提高了光学系统的光能利用率和成像质量;局部高分辨系统则能大大降低数据的传输速率。经过优化,系统焦距 $f' = 75 \sim 150$ mm,变焦比为 2,其中 75 mm 处视场角为 $x: 0 \sim 0.5^\circ$, $y: 3 \sim 10^\circ$; 150 mm 处视场角为 $x: 0 \sim 0.5^\circ$, $y: 1.7 \sim 5^\circ$, $F/\#$ 为 7~14。各焦距处任意 ROI 内的成像质量可均达到衍射极限。此类系统在空间光学、遥感等领域都有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 庞志海,樊学武,邹刚毅,等. 新型大视场无遮拦三反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2449-2452.
PANG ZH H, FAN X W, ZOU G Y, et al.. Design of new wide-angle unobscured three-mirror optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2449-2452. (in Chinese)
- [2] WICK D, MARTINEZ T. Adaptive optical zoom

- [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(1): 8-9.
- [3] 骆守俊,夏寅辉,杨宁宁,等. 扫描型长波红外连续变焦光学系统[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 107-113.
LUO SH J, XIA Y H, YANG N N, et al.. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 107-113. (in Chinese)
- [4] 王红,田铁印. 5倍变焦距光学系统小型化设计[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 315-319.

- WANG H, TIAN T Y. Miniature design of $5\times$ zoom optical system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 315-319. (in Chinese)
- [5] 苗健宇,张立平,翟岩,等. 小型连续变焦相机的结构实现[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 169-174.
- MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y, *et al.*. Structural realization of small zoom system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 169-174. (in Chinese)
- [6] SEIDL K, JKNOBBE J, GRUGER H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4097-4107.
- [7] ZHAO H, FAN X W, ZOU G Y, *et al.*. All-reflective optical bifocal zooming system without moving elements based on deformable mirror for space camera application[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1192-1210.
- [8] 沈本兰,常军,王希,等. 三反射主动变焦系统设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 140-146.
- SHEN B L, CHANG J, WANG X, *et al.*. Design of the active zoom system with three-mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140-146. (in Chinese)
- [9] 赵文才. 改进的离轴三反光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2837-2843.
- ZHAO W C. Design of improved off-axial TMA optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2837-2843. (in Chinese)
- [10] 程洪涛. 基于变形镜的三反射离轴变焦物镜设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1222002.
- CHENG H T. Design of three-mirror non-coaxial zoom objective based on deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1222002. (in Chinese)
- [11] 薛栋林,郑立功,张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2814-2820.
- XUE D L, ZHENG L G, ZHANG F. Off-axis three mirror system based on freeform mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2814-2820. (in Chinese)
- [12] 常军,翁志成,姜会林,等. 长焦距空间三反光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 315-318.
- CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)
- [13] WICK D, MARTINEZ T, RESTAINO S, *et al.*. Foveated imaging demonstration[J]. *Optics Express*, 2002, 10(1): 60-65.
- [14] XIE Y J, ZHU SH L, HU SH L, *et al.*. Space-based telescope with variable resolution at any field angle by active optical zoom[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1619-1624.
- [15] 周晓斌,栾亚东,焦明印,等. 基于 Zernike 模式法的变形反射镜补偿面型求解方法[J]. *红外技术*, 2014, 36(10): 782-786.
- ZHOU X B, LUAN Y D, JIAO M Y, *et al.*. Solving method of the deformable mirror compensation surface based on the Zernike method[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(10): 782-786. (in Chinese)

作者简介:



常 军(1973—),男,江西吉安人,博士,研究员,2002年于长春理工大学获得博士学位,2002年~2004年为长春光学精密机械与物理研究所博士后,主要从事光电系统设计、加工、检测等方面的工作。E-mail: bitchang@bit.edu.cn