

双小凹光学成像系统设计

冯驰 常军 杨海波

Design of dually foveated imaging optical system

Feng Chi Chang Jun Yang Hai-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于压缩感知超分辨鬼成像

Super-resolution ghost imaging via compressed sensing

物理学报.2014, 63(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224201>

线照明并行谱域光学相干层析成像系统与缺陷检测应用研究

Line-field parallel spectral domain optical coherence tomography and its application in defect inspection

物理学报.2014, 63(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194201>

双向使用高非线性光纤实现同时解复用出两路 10 Gbit/s 信号

Simultaneous demultiplexing into two 10 Gbit/s using a bidirectionally operated highly nonlinear fiber

物理学报.2014, 63(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024201>

用于轴对称的两级光学聚光器的非成像二次反射镜

Non-imaging secondary (NIS) for axial symmetrical two-stage optical concentrator

物理学报.2013, 62(13): 134209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134209>

基于自相位调制效应的硅基中红外全光二极管

All-optical diode in mid-infrared waveband based on self-phase modulation effect in silicon ring resonator

物理学报.2013, 62(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024201>

双小凹光学成像系统设计*

冯驰¹⁾ 常军^{1)†} 杨海波²⁾

1)(北京理工大学, 光电学院, 北京 100081)

2)(光电信息控制和安全技术重点实验室, 三河 065201)

(2014年5月28日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

随着科技发展, 如何解决大视场和高分辨率之间的矛盾成为了众多科技人员的研究重心之一, 本文提出了双小凹成像系统的概念, 在传统仿真人眼的单小凹成像系统的基础上, 通过引入反射式液晶空间光调制器对光学系统进行两个视场内波像差的调制, 改善对应的像差, 从而实现了大视场内低分辨率成像的条件下, 在两个特定的视场内满足高分辨率成像, 因此可解决大视场和高分辨率的矛盾. 本文通过设计一个参考波长为 587 nm, 视场为 60° (即 $\pm 30^\circ$), F 数为 $F/8$, 焦距为 60 mm 的双小凹光学成像系统, 并利用 CODE V 软件模拟仿真实现了 5° 和 17° 双视场高分辨率成像, 其余视场低分辨率成像, 并以 32×32 的采样分辨率计算了该系统的衍射效率, 验证了设计方法的科学性和准确性.

关键词: 小凹成像, 液晶空间光调制器, 高分辨率成像, 双视场

PACS: 42.15.Eq, 42.15.-i, 42.30.Lr, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.64.034201

1 引言

21 世纪以来, 在例如扫描识别, 跟踪定位的领域中, 对大视场, 高分辨率的快速轻小型成像系统的需求日益增大. 目前, 基于人眼成像原理的小凹成像系统作为一种新型的大视场、局部高分辨率成像系统, 不仅可以解决传统大视场、高分辨率成像光学系统笨重、复杂、价格昂贵的缺点, 同时因其只对局部区域实现高分辨率成像, 因此系统的成像数据量相对也少很多, 可以方便传输, 非常适合于远程遥控以及其他对图像数据处理和传输速度有较高要求的领域中.

在过去的 30 年中, 国内外的研究者对小凹成像系统进行了较深入的研究. 我国目前在小凹成像光学系统的研制领域, 水平处于跟踪研制阶段, 西安光机所、长春光机所等单位都开展了相应的研究.

2 双小凹成像系统

实现小凹成像系统的方法有多种, 例如小凹数

据压缩算法, 双探测器式小凹成像系统^[1,2]等. 自 2001 年 Martinez 等首次提出将一个液晶空间光调制器 (SLM) 放置在一个大视场角镜头的孔径光阑处来选择性地对全视场内期望视场点的像差进行补偿的小凹成像系统, 使用 SLM 的波前校正因无需使用图像处理算法的优势已经广泛地应用于大视场局部高分辨率成像系统中. 液晶 SLM 是灵活控制光波振幅或相位在空间中分布的可编程衍射光学元件, 具有质量小、功耗低、灵活、可实时控制等优点^[3]. 相位型 SLM 是实现光学小凹成像的最关键的主动光学元件, 是一种通过动态改变光程差来控制光学波前的反射式或者透射式器件^[4]. 但是由于像差是随视场角的变化而变化的, 因此引入 SLM 时, 只有一个视场角的像差可以被完整地校正. 以这个视场角为中心, 存在一个小的角度范围, 这个角度范围内的像差可以较好的被校正^[5]. 而这个范围取决于像差的大小和特定的成像应用中的校正需求^[6]. 因此, 在不考虑动态控制感兴趣视场的条件下, 若能合理分配光学系统的像差, SLM 可

* 光电信息控制与安全技术重点实验室 (批准号: 9140C150205120C1501) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bitchang@bit.edu.cn

以同时对两个不同的视场较好的校正像差, 达到高分辨率成像.

本文提出双小凹光学成像系统的概念, 通过引入反射式液晶 SLM 对光波相位进行调制达到局部高分辨率的目的, 即在保证两个不同的视场高分辨率成像的情况下, 其余视场低分辨率成像. 可以应用于扫描识别、跟踪定位等领域中.

3 液晶空间光调制器的工作原理

液晶 SLM 是通过控制光波相位或振幅在空间中分布的可编程的衍射光学元件. 其中, 相位型液晶 SLM 的核心部件是向列型液晶^[5], 在其每个单元的两平行玻璃板之间都填充了这种具有双折射效应的向列型液晶. 若想要改变其折射率, 只需在向列型液晶上施加一个局部电场, 通过液晶折射率的局部变化即可以控制光路在通过光阑时在每个像素上引入一个可变的相位延迟^[7], 实现波前校正的功能.

液晶 SLM 中的局部光程差是 $\Delta n \times d$, 其中 Δn 是在传播方向上折射率的变化, d 是光经过的物理路径. SLM 可以引入的最大光程差称为其相位行程, 而相位行程的大小取决于其单元间隙和液晶所能引起的最大折射率变化. 若波前像差小于 SLM 的相位行程, 因为光谱的带宽仅仅由液晶的分布结构决定, 则在有限的带宽下被动成像是可以被调制的^[5]; 若波前像差大于 SLM 的相位行程, 相位仍然能够以取模 2π 的量化处理的方式被调制^[5,8-10], 但是对波长取模校正大大的限制了小凹光学系统的光谱带宽. 因此, 在本文后续的光学设计中, 选择单波长为参考波长, 避免因波前像差大于 SLM 的相位行程造成的系统像差无法调制.

4 光学设计

本文中采用反射式液晶 SLM 对双小凹成像光学系统进行设计和仿真, 验证其双视场局部高分辨率的成像特性. 考虑到实际液晶 SLM 的约束和条件, 即 SLM 对光线入射角的要求, 我们选择系统的主要设计参数: 单波长 587 nm, 视场 60° (即 $\pm 30^\circ$), $F/8$, 焦距 60 mm.

利用 CODE V 软件进行模拟仿真, 得到初始结构由弯月形透镜、分光棱镜、空间光调制器、平凸透镜及像面组成. 不同视场角的光线通过弯月形透

镜进入分光棱镜中, 光线透射过分光棱镜到达液晶 SLM, 经液晶 SLM 反射后, 再次进入分光棱镜, 并经棱镜折转进入平凸透镜, 并最终会聚到像面上成像. 如图 1 所示.

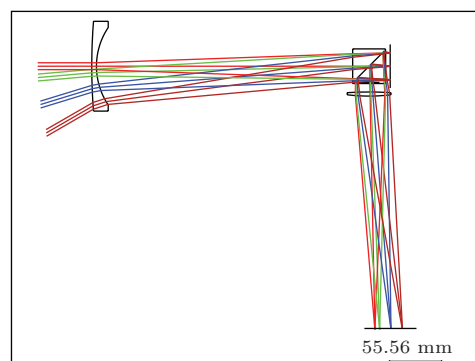
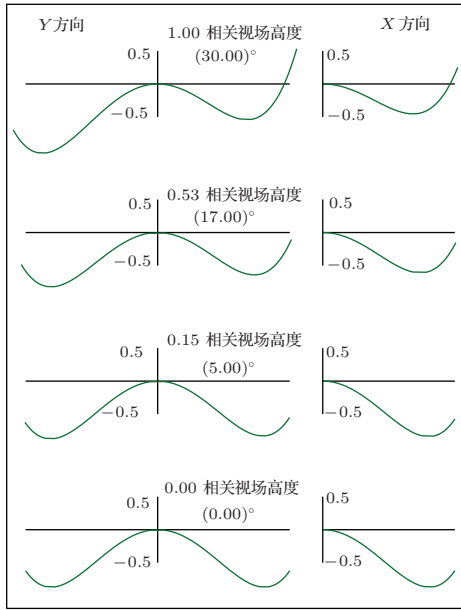


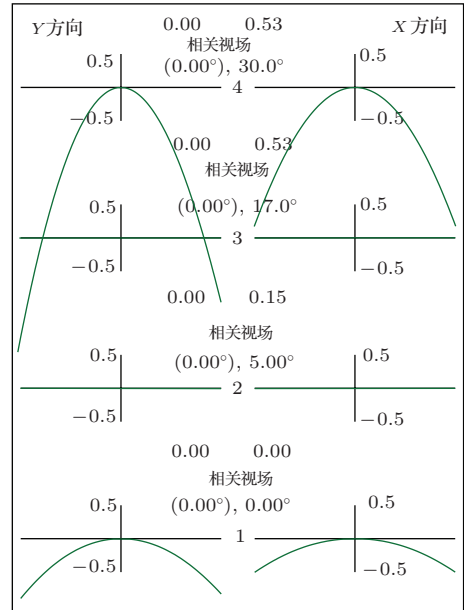
图 1 (网刊彩色) 双小凹成像系统二维光路图

图 2 为未加液晶 SLM 校正时初始系统的调制传递函数 (MTF) 曲线图和波像差图, 图 2(a) 中给出了未加液晶 SLM 校正波前像差时的各视场角的光程差 (OPD) 像差曲线, 可以看出系统存在较大的球差、场曲和负畸变等像差, 成像比较模糊. 图 2(b) 给出了各视场角的 MTF 曲线, 可以看出未加入液晶 SLM 校正时, 系统各个视场的 MTF 曲线比较差. 但是各个视场角的波像差和 MTF 值基本是均匀的. 可以认为, 初始系统在全视场获得一个比较均匀的成像质量.

在初始系统的基础上, 我们在孔径光阑处引入液晶 SLM 同时对 5° 和 17° 两个视场进行相位补偿, 通过对光学系统的优化设计^[11], 最终的得到双小凹成像系统. 从图 3(a) 中可以看到, 引入液晶 SLM 校正后, 5° 和 17° 两个视场的像差值几乎减小到 0, 而其余的视场仍存在球差等残余像差, 整个系统仍存在较大的负畸变; 由图 3(b) 可知, 5° 和 17° 两个视场的 MTF 曲线几乎接近衍射极限. 图 4 为 5° 和 17° 两个视场的光瞳图. 引入 SLM 前后系统的波像差值如表 1. 5° 视场的波像差均方根值 (RMS) 为 0.004 waves, 峰谷值 ($P-V$ 值) 为 0.016 waves; 17° 视场的波像差均方根值 (RMS) 为 0.003 waves, 峰谷值 ($P-V$ 值) 为 0.014 waves, 均符合瑞利判断, 而其余视场的 $P-V$ 值都大于 0.25 waves. 因此, 相对于初始系统, 液晶 SLM 的引入调制了约 2 waves 的残余像差, 引入液晶 SLM 后的光学系统可以实现双小凹局部高分辨, 其余视场低分辨率的成像需求.



(a)



(a)

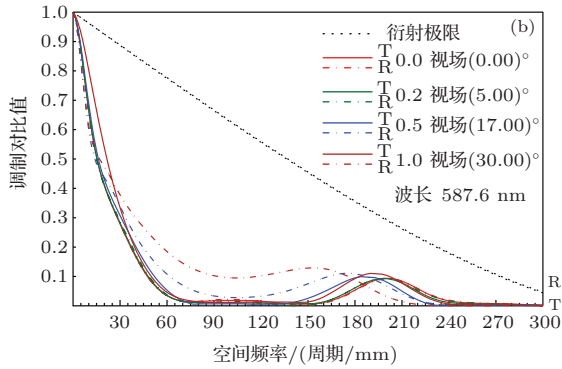


图2 (网刊彩色) 初始系统的 MTF 图和波像差图 (a) 初始系统的 OPD 曲线; (b) 初始系统的 MTF 曲线

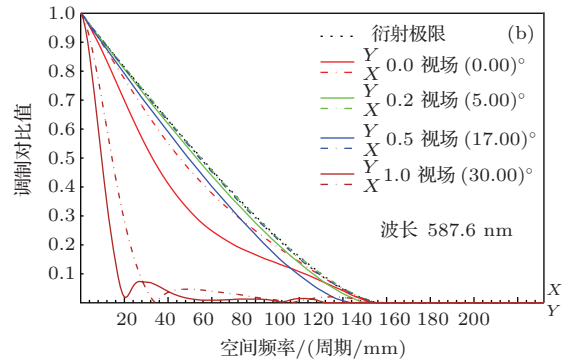


图3 (网刊彩色) 引入液晶 SLM 校正后光学系统的波像差曲线和 MTF 曲线图 (a) 校正后系统的 OPD 曲线; (b) 校正后系统的 MTF 曲线



图4 引入液晶 SLM 校正后 5° 和 17° 视场的光瞳图 (a) 5° 视场的光瞳图; (b) 17° 视场的光瞳图

表1 引入 SLM 校正前后光学系统的波像差值

视场角/(°)	SLM 校正前		SLM 校正后	
	RMS 值/waves	P-V 值/waves	RMS 值/waves	P-V 值/waves
(0, 0)	0.342	1.334	0.093	0.384
(0, 5)	0.332	1.406	0.004	0.016
(0, 17)	0.452	2.292	0.003	0.014
(0, 30)	0.465	2.807	0.454	1.467

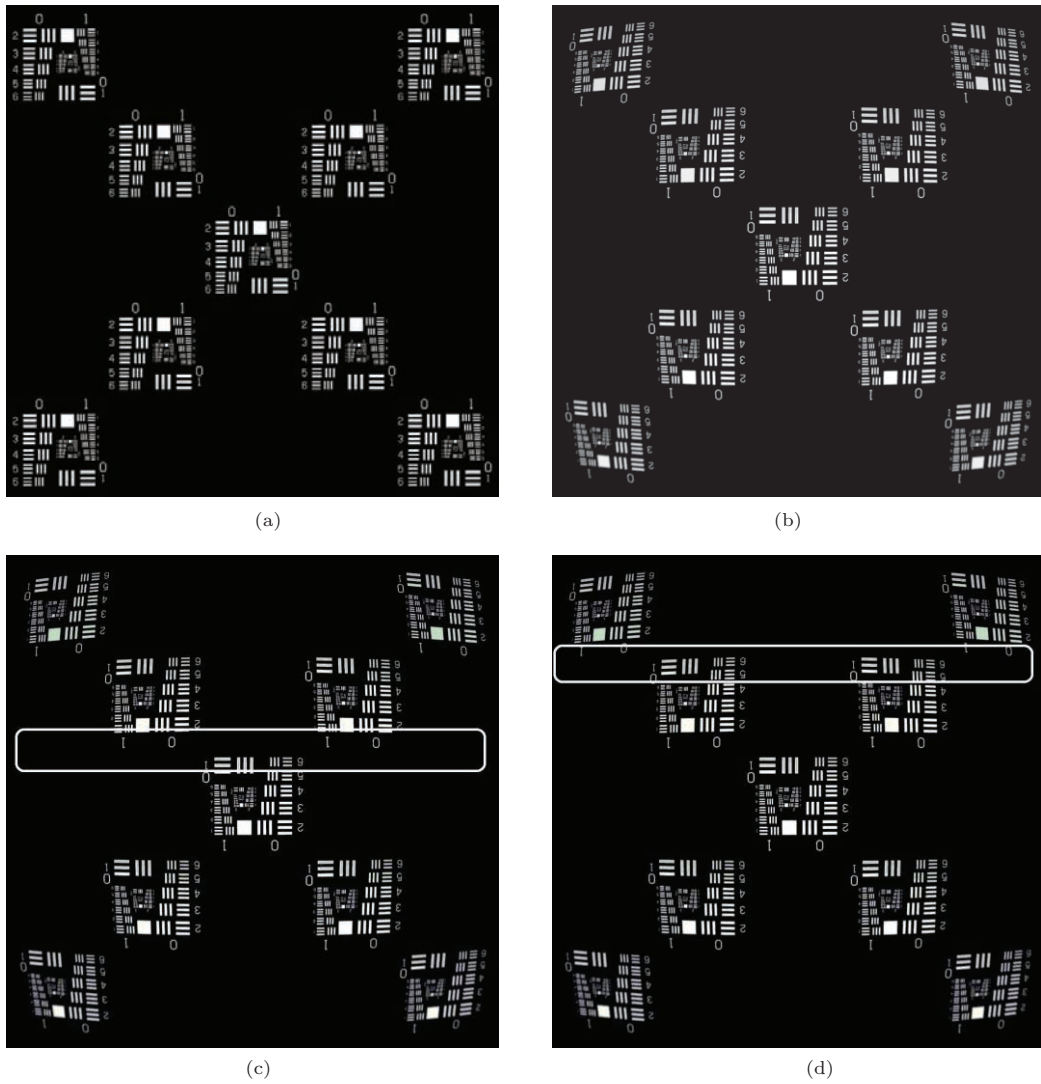


图5 双小凹系统仿真成像对比图 (a) 原图; (b) 初始结构成像仿真图; (c) 5° 视场成像仿真图; (d) 17° 视场成像仿真图

5 二维模拟仿真

利用CODE V软件的二维仿真功能, 对上述双小凹成像系统进行成像仿真模拟. 图5为仿真成像对比图. 可以看到, 5° 和17° 两个不同视场可以达到高分辨率成像, 其余视场低分辨率成像.

6 计算系统的衍射效率

由于系统中使用了液晶空间光调制器, 它的离散的像素结构为系统引入衍射效应, 对成像质量造成影响. 一方面是因为像素的部分区域是不透光的覆盖电路布线的荫罩, 形成类似网格结构的周期性振幅, 引起的二维振幅光栅造成了振幅衍射效应. 另一方面是由液晶SLM引入的离散的阶梯状光程差在每个像素局部未校正的残留波像差所造成的,

产生具有与振幅光栅同样周期的锯齿状相位结构, 形成二维闪耀光栅的衍射效应^[12].

本文采用Curatu^[4]提出的计算小凹成像系统衍射效率和衍射MTF的方法. 通过CODE V软件获取以二维 $N \times N$ 阵列的形式获得光学系统在任意视场角的光瞳像差, 即波前图. 我们将采样分辨率, 即液晶SLM的分辨率自定义为 32×32 . 因此, 当 $N \times N$ 分辨率的液晶SLM校正ROI区域的波像差时, 在每个像素点 $[i, j]$ 的阶梯状光程差校正所引起的残留波像差P-V值, 就可以直接从波前图 $W_{ROI}[i, j]$ 中得到^[12]

$$\begin{aligned} & \text{RWFE}_{P-V_x}[i, j] \\ &= |W_{ROI}[i+1, j] - W_{ROI}[i, j]|, \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & \text{RWFE}_{P-V_y}[i, j] \\ &= |W_{ROI}[i, j+1] - W_{ROI}[i, j]|. \end{aligned} \quad (1b)$$

目前可获得的最小的电子荫罩宽度为 $2.8 \mu\text{m}$ ^[12], 假设液晶SLM的荫罩宽度为 $w = 2.8 \mu\text{m}$. 假设方形液晶SLM覆盖了光学系统的整个圆形光瞳, 光阑直径为 D_{Stop} . 通过计算像素间距 a 、有效像素宽度 b 、像素填充因子 $(b/a)^2$, 从而可以计算:

每一衍射级在每个像素上的局部衍射效率

$$\begin{aligned} & \sigma_{m_x, m_y} [i, j] \\ &= \left(\frac{b}{a}\right)^4 \text{sinc}^2 \left[\frac{b}{a} \left(m_x - \frac{\text{RWFE}_{\text{P-V}x} [i, j]}{\lambda} \right) \right] \\ & \times \text{sinc}^2 \left[\frac{b}{a} \left(m_y - \frac{\text{RWFE}_{\text{P-V}y} [i, j]}{\lambda} \right) \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

整体衍射效率

$$\sigma_{m_x, m_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i,j=1}^N (\sigma_{m_x, m_y} [i, j])^2}{N^2}}. \quad (3)$$

衍射MTF为

$$\text{MTF} (\xi = 0) = \frac{\sigma_{0,0}}{b/a}. \quad (4)$$

本文所设计的双小凹光学系统的孔径光阑直径 $D_{\text{Stop}} = 29.26 \text{ mm}$, 则有计算结果为

5° 视场的零级衍射效率 $\sigma_{0,0} = 98.7\%$,

$$\text{MTF} (\xi = 0) = 99.0\%;$$

17° 视场的零级衍射效率 $\sigma_{0,0} = 98.78\%$,

$$\text{MTF} (\xi = 0) = 99.1\%.$$

由以上计算可知, 被调制的视场的衍射效率很高, 这与系统本身的像差大小和孔径光阑的大小都有关系.

7 结 论

本文通过引入反射式液晶空间光调制器改变光程差来进行相位补偿以达到像差校正的目的, 模

拟设计了一个具有 60° 视场的双小凹光学成像系统, 通过上述模拟仿真实现了 5° 和 17° 双视场高分辨率成像, 其余视场低分辨率成像. 相比于传统的光学系统, 双小凹光学成像系统不仅具有结构紧凑、光学材料简单、零级衍射效率高、传输带宽小等小凹成像系统的优势, 同时因可对两个不同视场高分辨率成像, 具有两个视场可同时用于定位和观察等功能, 因此, 双小凹成像光学系统可以应用于扫描识别、跟踪定位等领域中.

参考文献

- [1] Hua H, Liu S 2008 *Appl. Opt.* **47** 317
- [2] Jianwei Yang, Miami *US Patent* 7973834 [2011-05-07]
- [3] Wang Y Q, Liu T G 2007 *Journal of Jiaozuo University* **3** 82 (in Chinese) [王永强, 刘太刚 2007 焦作大学学报 **3** 82]
- [4] Efron U 1995 *Spatial Light Modulator Technology: Materials, Devices and Applications* (New York: Marcel Dekker Inc)p96
- [5] Martinez T, Wick D V, Restaino S R 2001 *Opt. Express* **8** 555
- [6] George Curatu, James Harvey E 2009 *Ph. D. Dissertation* (US: University of Central Florida)
- [7] Beeckman J, Neyts K, Pieter Vanbrabant J M 2011 *Opt. Engineering*. **50** 081201
- [8] Love G D 1997 *Appl. Opt.* **36** 1517
- [9] Cai D M, Ling N, Jiang W H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 897 (in Chinese) [蔡冬梅, 凌宁, 姜文汉 2008 物理学报 **57** 897]
- [10] Liu Y, Cao Z, Li D, Mu Q 2006 *Opt. Engineering* **45** 128001
- [11] Liu J G, Li Y, Li L, Huang Y F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 565
- [12] Peng Q Q 2011 *Dissertatio M Sn* (Beijing: Beijing Institute of Technology) (in Chinese) [彭晴晴 2011 硕士学位论文(北京: 北京理工大学)]

Design of dually foveated imaging optical system*

Feng Chi¹⁾ Chang Jun^{1)†} Yang Hai-Bo²⁾

1) (*School of optoelectronics, Beijing Insitute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China*)

(Received 28 May 2014; revised manuscript received 18 August 2014)

Abstract

With the advances in technology, how to solve the problem of contradiction between the large field of view and high resolution of images becomes one of the research focus of many scientific researchers. In this paper we present the concept of dually foveated imaging optical system, based on the traditional singly foveated imaging system which simulates the human eye, by introducing a reflective liquid crystal spatial light modulator for modulating the aberrations of two fields of a view, so improving the corresponding aberrations and achieving high-resolution image of the two different fields of view, while the remaining fields of the view are of low-resolution image. In this way it can solve the contradiction between the large field of view and high resolution image. In this paper, we design a dually foveated imaging optical system with the following parameters: reference wavelength is 587 nm, the field of view is 60° (i.e., $\pm 30^\circ$), $F/8$, the focal length is 60 mm. Simulation is conducted by CODE V, achieving a 5° and 17° dual field high-resolution image, and the remaining field being of low-resolution image; and calculation shows the high diffraction efficiency of the system with sampling resolution of 32×32 , verifying the scientificness and accuracy of the design method.

Keywords: foveated image, spatial light modulator, high-resolution image, dual fields

PACS: 42.15.Eq, 42.15.-i, 42.30.Lr, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.64.034201

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 9140C150205120C1501).

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