

## 应用波前编码技术的离轴三反系统的设计及其分析

闫 锋<sup>1,2</sup>, 张学军<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学技术研究中心, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100084)

**摘 要:**波前编码技术是一种新兴的“光学-数字”一体化成像技术,可以在保持光学系统相对孔径不变的情况下扩展其焦深,并控制与离焦有关的像差。这一特性使得该技术在空间相机上的应用有着广阔的前景。讨论了波前编码技术在空间用离轴三反光学系统上的应用,通过建立以次镜为波前编码元件的过渡模型给出了光学设计的结果,并以调制传递函数(MTF)为评价尺度对传统系统和应用波前编码技术的新系统的成像特性进行了对比;同时讨论了焦深扩展因子对系统焦深扩展程度以及成像质量的影响。分析结果证明了波前编码技术在空间光学系统上的巨大应用价值。

**关键词:**波前编码; 次镜; 焦深; 光瞳函数; MTF

中图分类号:O439 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2008)06-1048-05

## Application of wavefront coding technology on TMA system

YAN Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xue-jun<sup>1</sup>

- (1. Optical Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

**Abstract:**The wavefront coding technology (WFC) is an innovative technology that joints the optical design and digital image processing together. The optical system with the WFC technology becomes very insensitive to the defocus aberration and other aberrations related defocus while the relative aperture keeps the same. The depth of focus can be extended by means of WFC technology. The characteristic of this technology is extremely attractive on space camera. As known, it is difficult to maintain focal plane position of space-borne camera within its depth of focus because of the severe working condition. Plenty of technique is employed to control defocus and defocus-related aberrations due to launch shock and thermal loading in orbit. That the application of WFC on TMA system for space-borne camera was presented. A new feasible way to solve these problems was provided. A transition model was established to redesign the optical system, in which the secondary mirror was selected to be the wavefront coded element. It is shown that the defocus is truly extended by the MTF comparison between the traditional system and the innovative system adopting WFC. A DOF extending factor was defined and its effect on wavefront coded system was also discussed. It can be concluded that WFC technology provides with great potential on improving the robust of space optical system.

**Key words:**Wavefront coding; Secondary mirror; Depth of focus; Pupil function; MTF

收稿日期:2008-04-04; 修订日期:2008-05-20

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(69925512)

作者简介:闫锋(1981-),男,吉林长春人,博士生,从事波前编码、光学制造、光学检测方面的研究。Email:greatyf@mail.nankai.edu.cn

导师简介:张学军(1968-),男,黑龙江齐齐哈尔人,所长助理,研究员,博士生导师,博士,主要从事先进光学加工、检测技术、空间光学系统制造方面的研究。Email:zxj@ciomp.ac.cn

### 1 波前编码技术

空间光学遥感系统工作在恶劣的外层空间,轨道各处温差极大,如何补偿由温度梯度引起的离焦及其相关像差,是系统热控设计、调焦机构设计等需要面对的难题。在图像处理过程当中,由视场变化引起的传递函数变化也是现有图像处理技术难以解决的问题。以光学-数字-一体化为核心理念的波前编码技术则可以很好地控制离焦误差以及与离焦相关的像散、场曲等误差,有效降低调整公差要求以及热控难度。在光学系统部分,利用在出瞳或者孔径光阑位置加入相位掩模板等方式,利用相位掩模、表面调制等手段对成像波前(通常在出瞳位置)附加一个由模糊函数理论计算出的三次相位分布。当理想的光瞳函数变为(一维情况)<sup>[1-3]</sup>:

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\alpha x^3) & \text{当 } |x| \leq 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad |\alpha| \gg 20 \quad (1)$$

在  $\alpha$  较大情况下,其光学传递函数  $H(u)$  则变为:

$$H(u) \approx \left( \frac{\pi}{12|\alpha u|} \right)^{1/2} \exp\left(j \frac{\alpha u^3}{4}\right) \quad (2)$$

此时  $H(u)$  中不再含有离焦量  $W_{20}$ , 系统对离焦误差变得极不敏感,相当于焦深被扩大了。将该结果推广到二维情况:对于实际光学系统,在光瞳函数上引入形如  $\alpha(x^3+y^3)$  的相位分布就可以实现对系统焦深的扩展。虽然引入的相位分布改变了原有空间信息的排列(可以理解为对空间信息的“编码”),使得此时所得的图像是模糊的,然而在理想像面两侧几倍焦深范围内该图像对离焦和视场变化极不敏感。在图像处理部分,针对图像对离焦和视场极不敏感的特性,只要采用一个简单的滤波器,就可以实现对中间图像的“解码”,进而重构清晰、锐利的最终图像。虽然在滤波过程中会放大一些潜在噪声,但是只要进行合适的去噪处理,最后的噪声水平仍可以控制在允许范围之内,因此,波前编码技术也可以看作是可以接受的噪声放大与扩大系统像差容限的一种交换(trade-off)。这种技术并不需要知道离焦量的确切数值,对于空间光学系统的离焦误差控制是十分有益的。

S. Prasad 等<sup>[1]</sup>指出通过控制光学系统的光瞳函数

可以提高其成像质量。Samir Mezouari 等<sup>[2]</sup>给出了几种可以控制离焦和三级像差的振幅型、相位型掩模板设计,并提出波前编码技术可以控制热成像系统中的像差。20 世纪 90 年代初,美国科罗拉多大学率先推出了应用波前编码技术的实用化产品,采用立方相位掩模板(Cubic phase mask plate)对成像光束附加一定的相位,使空间变化的点扩散函数形成的图像适合于简单容易的图像处理;随后,CDM 公司购买了该专利,并进行了深入研究。该公司的 Edward R. Dowski<sup>[3]</sup>及其团队给出了应用波前编码技术光学系统的基本模型,论证了在中波红外成像系统中该技术的应用可以减轻质量、降低成本,并分析了波前编码技术应用在空间光学系统的可行性。G. A. Cirino 等<sup>[4]</sup>将波前编码技术技术应用到了主动红外运动传感器上,而 R. Porras 等<sup>[5]</sup>则提出在天文仪器上应用该技术的方案。目前,波前编码技术已经在虹膜识别系统、长波红外成像系统、二维条码识别等领域得到了广泛的应用<sup>[6-11]</sup>。文中重点讨论波前编码技术在空间相机 TMA 光学系统上的应用。

### 2 过渡模型的建立

本工作的开展是基于一个初步完成像差平衡的 TMA 遥感成像系统,其基本参数如下:焦距为 1 650 mm;  $F\#$  为 6;视场为  $1.5^\circ \times 5^\circ$ ;工作波长为  $0.5 \mu\text{m}$ 。

主镜、三镜为双曲面,次镜为椭球面。如图 1 所示,该系统各视场的 MTF 虽然未达到衍射极限,但对下一步的设计工作没有影响。

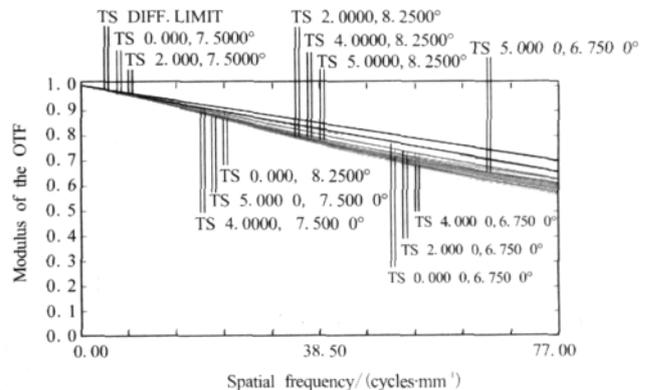


图 1 原系统的 MTF 曲线

Fig.1 MTF curves of original system

根据焦深的公式  $DOF=2\lambda(F\#)^2=36 \mu\text{m}$ , 对于应用于空间相机的光学系统,在空间工作条件下把像面

严格控制在这么短的焦深范围内是非常困难的。

由于离轴三反系统的孔径光阑在次镜位置,因此该系统是不具有实光瞳的,即没有实际光线通过出瞳,也就不可能通过传统的在出瞳位置附加相位掩模板等简单的办法引入对光瞳函数的相位调制。这里基于孔径光阑位于次镜上的特性,通过修改次镜的面形来实现,即将需要引入到光瞳函数的相位分布(可以理解为一种波相差)过渡到次镜的面形修正。为此,建立了一个过渡模型。

要在出瞳上引入形如  $\alpha(x^3+y^3)$  的相位分布,则相应的光程差可以表示为:

$$OPD_{EP} = \frac{\alpha(x^3+y^3)}{k} = \alpha \cdot \frac{\lambda}{2\pi} (x^3+y^3) \quad (3)$$

在这里把光程差看作是由出瞳面的面形改变引入的:

$$\Delta S_{EP}(x,y) = OPD_{EP} = \alpha \cdot \frac{\lambda}{2\pi} (x^3+y^3) \quad (4)$$

对于本系统,出瞳是孔径光阑关于三镜的像。忽略三镜对孔径光阑成像时所引入的像差,只考虑其放大的作用,从而将出瞳面的面形改变过渡到孔径光阑上。在出瞳面以及孔径光阑上都采用归一化坐标,根据图 2 所示的几何关系可以得到:

$$\Delta S_{stop}(x,y) \approx \alpha \cdot \frac{R_{stop}}{R_{EP}} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} (x^3+y^3) \quad (5)$$

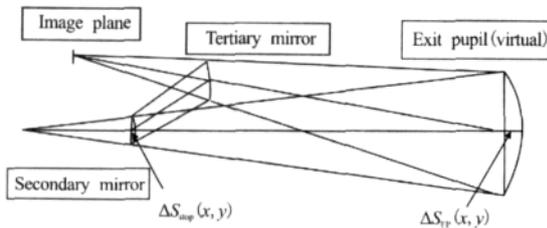


图 2 简化光路示意图  
Fig.2 Simplified optical path

由于孔径光阑刚好位于次镜的位置,因此可以把  $\Delta S_{stop}(x,y)$  附加在次镜的面型上:

$$\Delta S_{sec}(x,y) = \Delta S_{stop}(x,y) \quad (6)$$

由于经过修正的次镜已经变成了含有  $(x^3+y^3)$  非回转对称非球面,常用的表面包括标准表面、偶次非球面和奇次非球面,已不再适用。为了表达次镜特殊的表面形式,采用扩展多项式表面。此时次镜的面型方程为:

$$z(x,y) = \frac{c(x^2+y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2+y^2)}} + \beta(x^3+y^3) \quad (7)$$

$$\beta = \alpha \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{R_{stop}}{R_{EP}} \cdot \frac{1}{R_{stop}^3} \quad (8)$$

式中:  $\frac{1}{R_{stop}^3}$  为归一化因子;  $\alpha \gg 20$ 。

将次镜面型修正后的系统称为新系统。下面以调制传递函数 MTF 为评判尺度来验证新系统对焦深的扩展作用。设系统的像距为  $D$ , 焦深为  $DOF$ , 从  $D-5DOF$  到  $D+5DOF$  范围内取 11 个像面, 在每个像面处分别求取原系统与新系统的 MTF 进行对比, 每两个像面之间的距离为系统的一倍焦深。

通过比较可以发现,原系统的传递函数随着离焦量的增大而剧烈变化,而新系统的传递函数虽然偏离了理想的传递函数,但是在很大范围内保持了很好的一致性,几乎与离焦量的变化无关。因此新系统完全达到了扩展焦深的目的。图 3 中比较的是中心视场

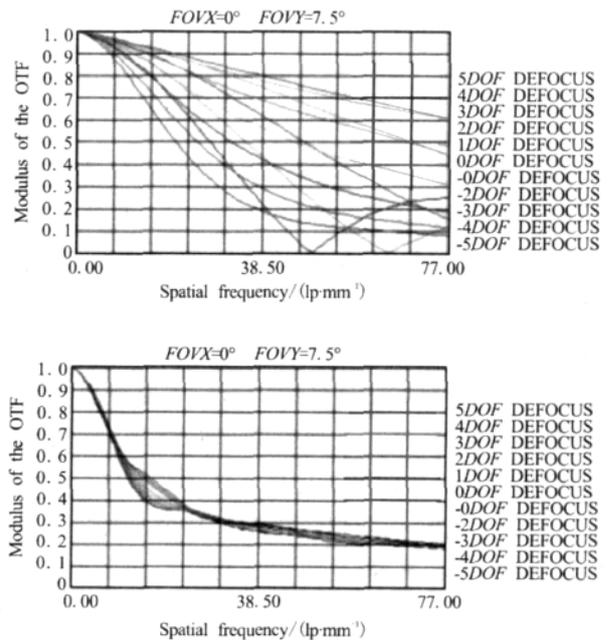


图 3 原系统与新系统传函的对比  
Fig.3 Comparison of MTF curves between original and new system

的传函,图 4 中给出了新系统两个轴外视场在 10 倍原系统焦深范围内的传函,可以看到不同像面位置处的传函彼此差别很小。可以验证,新系统在全视场范围内的传函都保持了很好的一致性,在此不再赘述。

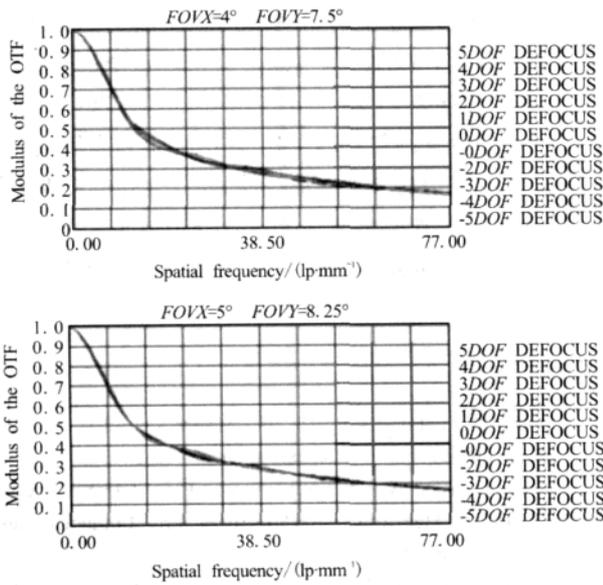


图 4 两个轴外视场在相当于原系统 10 倍焦深范围内的传函示意图

Fig.4 MTF curves of two off-axis field of view in 10 DOF of original system

### 3 焦深扩展范围的研究

如前所述,波前编码技术确实可以扩展系统的焦深,但是这种扩展不可能是没有限制的。对于一维的光学传递函数(保留在公式(7)中略去的含有离焦误差的项):

$$H(u) \approx \left( \frac{\pi}{12|\alpha u|} \right)^{1/2} \exp\left(j \frac{\alpha u^3}{4}\right) \exp\left(-j \frac{\Psi^2 u}{3\alpha}\right) \quad (9)$$

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} W_{20} \quad (9)$$

可以看到传递函数的幅值部分与离焦量无关,只与  $\alpha$  有关。相位部分由两项组成,第一项与离焦量无关,后一项  $\exp\left(-j \frac{\Psi^2 u}{3\alpha}\right)$  则是离焦量  $\Psi$  的函数并且与空间频率  $u$  成线性关系。但是这一项只与系统点扩散函数(PSF)的空间位置有关,并且容易通过调节  $\alpha$  的大小来控制这一项对系统传递函数的影响。而在实际应用当中,通常选取大的  $\alpha$  来降低系统点扩散函数对离焦量的敏感程度,以至于足够大的  $\alpha$  可以将离焦量对系统传函的影响忽略不计。这也就是在  $\alpha \gg 20$  的情况下,  $H(u)$  可以写作公式(7)的原因。显然,  $\alpha$  越大,离焦量的变化对系统传函的影响就越小,焦深被扩展的就越大。因此,不妨把  $\alpha$  称为系统的焦深扩展因子。虽然出于扩展焦深的考虑,希望  $\alpha$  越大越好,但是,  $\alpha$  选取得过大,就会造成传函高频段的幅值减小,甚至造成高频信息的丢失,表现在系统点扩散函数上就是能量分布在空间上进一步弥散,这将给后续的图片复原

处理造成难以克服的困难。图 5 将上面系统中的  $\alpha$  扩大 5 倍,再来评价系统的传函。

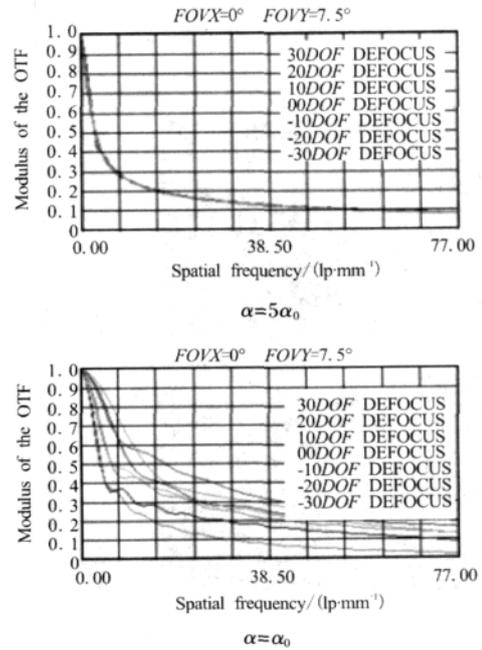


图 5 当  $\alpha=5\alpha_0$  与  $\alpha=\alpha_0$  时 MTF 曲线对比示意图

Fig 5 MTF curves of system when  $\alpha=5\alpha_0$  and  $\alpha=\alpha_0$

可以看到,在  $\pm 30DOF$  的范围内,当  $\alpha=5\alpha_0$  时系统传函保持了很好的一致性,对系统焦深的扩展不可谓不大;而在  $\alpha=\alpha_0$  时系统的传函则有了比较剧烈的变化,从图 6 的对比上看,传函已经下降很多了。

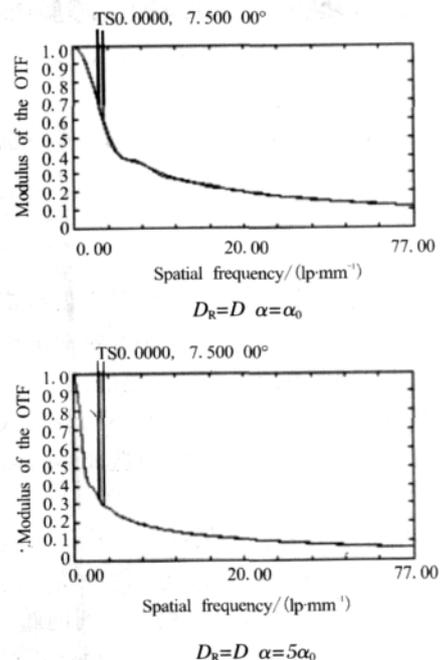


图 6 不同  $\alpha$  的系统传函对比

Fig.6 Comparison of MTF curves of systems with different  $\alpha$

再从点扩散函数的空间分布上看(图7), $\alpha$ 过大使点扩散函数的能量分布在空间上进一步弥散,主极大能量减小,其他各级极大能量增加,这样对于后续的图像处理是相当不利的,如图8所示,对点光源的计算机模拟成像实验也证明了这一点。

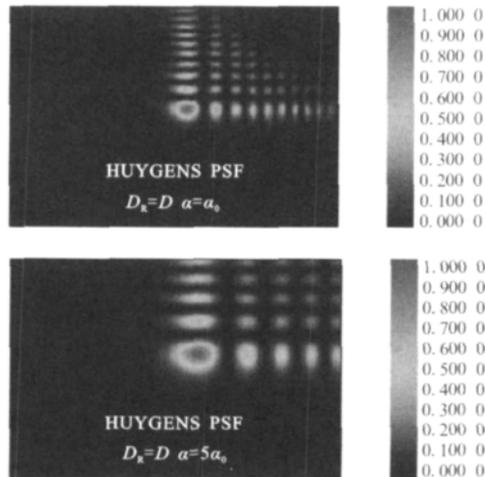
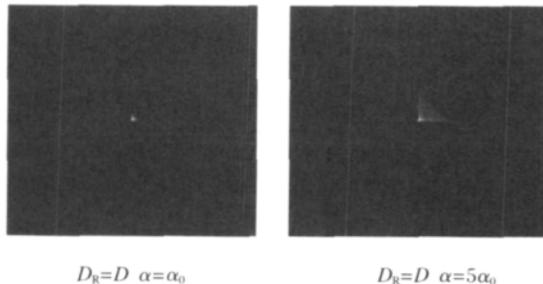


图7 不同 $\alpha$ 的系统点扩散函数对比

Fig.7 Comparison of PSF of systems with different  $\alpha$



$D_k=D \alpha=\alpha_0$

$D_k=D \alpha=5\alpha_0$

图8 不同 $\alpha$ 的系统对点光源模拟成像结果对比

Fig.8 Comparison of simulated images of spot of systems with different  $\alpha$

## 4 结 论

目前,绝大多数空间相机为消除离焦误差都带有自动离焦补偿装置,通常这样的装置需要知道确切的离焦量才能给出正确的补偿,但在多数情况下离焦量是不可能精确得到的。而且自动离焦补偿装置大都复杂、精密、昂贵,不仅增加了相机的制造成本以及在轨不稳定性,还增加了系统地面装调的难度。波前编码技术则有望在不增加额外元件的情况下,在较大范围内实现对离焦误差的控制,将传统的硬件补偿变为软件补偿,从而避免传统补偿方式带来的一系列问题。

红外光学系统为收集更多的光能往往将相对孔径设计得很大,这导致系统焦深极为有限,对装调的公差要求极为苛刻。波前编码技术则可以在不牺牲系统相对

孔径的条件下扩展系统的焦深,大大降低装调的难度。

波前编码技术的应用可以大大扩展系统的焦深,很好地控制离焦误差。然而新系统得到的图像都是不理想的,必须通过后续图像处理过程,才能够得到高质量的最终图像。因此,构建合适的滤波器,建立合理的图像复原机制是下一步工作的重点。随着先进光学加工、检测、装调等技术的不断成熟,波前编码技术将在空间相机、大相对孔径红外系统等方面有着极为广泛重要的应用。

## 参考文献:

- [1] PRASAD S, PANCA V P, PLEMMONS R J, et al. Pupil - phase optimization for extended -focus, aberration -corrected imaging systems[C]//*Proceedings of SPIE, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XIV*, 2004, **5559**:335-345.
- [2] MEZOUARI S, HARVEY A R. Primary aberrations alleviated with phase pupil filters [C]//*Proceedings of SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization V*, 2002, **4768**:21-31.
- [3] KUBALA K, DOWSKI E, KOBUS J, et al. Design and optimization of aberration and error invariant space telescope systems [C]//*Proceedings of SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization VII*, 2004, **5524**:54-65.
- [4] Giuseppe Antonio Cirino, Luiz Goncalves Neto. Design of cubic -phase distribution lenses for passive infrared motion sensors [C]//*Proceedings of SPIE, Thermosense XXV*, 2003, **5073**:476-484.
- [5] PORRAS R, VÁZQUEZ S, CASTRO J. Wavefront coding technology in the optical design of astronomical instruments [C]//*Proceedings of SPIE, 5th Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications*, 2004, **5622**:796-800.
- [6] Ramkumar Narayanswamy, Alan E Baron, Vladislav Chumachenko, et al. Applications of wavefront coded imaging [C]//*Proceedings of SPIE, Computational Imaging II*, 2004, **5299**:163-174.
- [7] YAN Feng, ZHENG Li -gong, ZHANG Xue -jun. Image restoration of an off -axis three -mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(1):017006.
- [8] YAN Feng, ZHENG Li -gong, ZHANG Xue -jun. Design of an off -axis three -mirror anastigmatic optical system with wavefront coding technology [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(6):063001.
- [9] ZHANG Xue -jun, LI Zhi -lai, ZHANG Zhong -yu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5):577-582. (in Chinese)
- [10] ZHANG Liang, AN Yuan, JIN Guang. Optical design of the uncoaxial three -mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2):278-280. (in Chinese)
- [11] WANG Yun -xia, LU Zhen -wu, LIU Hua, et al. Application of freeform surface prism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3):319-321. (in Chinese)