

600 mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计

曹召良^{1,2} 穆全全^{1,2} 胡立发¹ 彭增辉¹ 刘永刚¹ 宣 丽¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 为了与 600 mm 望远镜匹配以验证液晶自适应光学的有效性, 利用 Zemax 光学设计软件进行了液晶自适应光学系统的设计和优化。根据望远镜的参量、大气湍流的特性和液晶的特点提出设计要求, 然后进行光学系统设计和 Zemax 软件模拟优化, 设计出了满足要求的系统。对该光学系统进行性能评价。设计出的系统与望远镜的组合焦距为 35 m, F 数为 58。求得光学系统在像面处的极限线分辨力为 $44.8 \mu\text{m}$, 成像 CCD 的像元尺寸为 $16 \mu\text{m}$, 满足采样定理。液晶自适应光学系统的调制传递函数与衍射极限传递函数非常接近, 而且系统的光程差像差在 0.1λ 左右, 说明系统具备优良的光学性能。

关键词 光学设计; 自适应光学; 望远镜; Zemax 软件

中图分类号 TH754 **文献标识码** A

Design on Liquid Crystal Adaptive Optical System for 600 mm Telescope

Cao Zhaoliang^{1,2} Mu Quanquan^{1,2} Hu Lifa¹ Peng Zenghui¹ Liu Yonggang¹ Xuan Li¹

(¹ State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract In order to verify the validity of liquid crystal adaptive optics with a 600 mm telescope, Zemax software is used to design the liquid crystal adaptive optical system. The design demands are given according to the parameters of telescope, the turbulence and the liquid crystal. The optical system is designed with the above demands with Zemax software, and the characteristic of the system is evaluated. The focal length of the whole optical system is 35 m and the F number is 58. The limited line resolution at the image plane is $44.8 \mu\text{m}$. It satisfies the sampling theorem because the size of the imaging CCD is $16 \mu\text{m}$. Designed modulation transfer function (MTF) of the liquid crystal adaptive optical system is almost the same as the diffraction limited MTF. Optical path difference (OPD) aberration of the system is about 0.1λ . The results show that the adaptive optical system has better optical characteristics.

Key words optical design; adaptive optics; telescope; Zemax software

1 引 言

自适应光学系统在地基望远镜中得到广泛的应用, 以提高望远镜的极限分辨力。传统的自适应光学系统以变形镜为波前校正器件, 其特点是响应速度快, 但是由于昂贵的价格、受限的单元数和宏观的机械运动等问题, 使其在应用方面受到越来越大的限制。为此, 许多新兴的波前校正器件, 如液晶波前校正器^[1~9]和微机械变形镜^[10]等受到人们越来越

多的关注。2002 年, 美国利用双频液晶波前校正器在 1.12 m 口径的望远镜上实现了对国际空间站的实时校正观测^[11], 这使得液晶波前校正器受到更多的关注。

长春人造卫星观测站主要对卫星进行观测和跟踪。其口径 600 mm 的望远镜主要用于人造卫星激光测距^[12]。为了研究基于液晶波前校正器的自适应光学系统的校正能力, 计划在口径 600 mm 的望远镜

收稿日期: 2007-07-09; 收到修改稿日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(60578035, 50473040)和吉林省科委基金(20050520, 20050321-2)资助课题。

作者简介: 曹召良(1974—), 男, 助理研究员, 主要从事液晶自适应光学、衍射光学和光学设计等方面的研究。

E-mail: caozlok@yahoo.com.cn

上进行校正实验。为此,本工作进行了液晶自适应系统的光学设计,以实现和望远镜的匹配和对接。

2 600 mm 望远镜光学系统

长春人造卫星观测站第二人造卫星激光测距仪的光学系统由主光路系统、大视场导星系统和激光发射系统组成。计划将自适应光学系统与主光路目视导星系统对接,以实现大气湍流的实时校正。主光路目视导星系统如图 1 所示,其为卡塞格林型系统,其口径为 600 mm,主镜为抛物面镜,次镜为双曲面。该系统既能够接收卫星激光回波,又能够目视跟踪卫星。该功能可以利用弯月镜实现,其第一面镀有 532 nm 窄带激光全反膜,把系统接收的激光回波反射到次镜后面光电倍增管的阴极面上。而其他波段的光则可以透过弯月镜经折轴镜和改正镜,最后进入目镜用于目视跟踪。

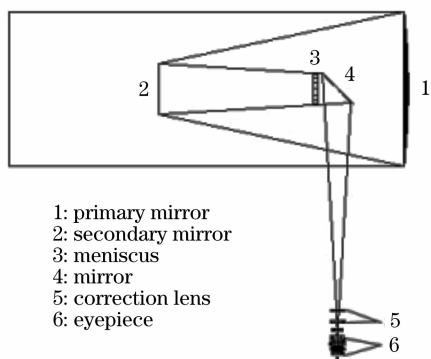


图 1 主光路目视导星系统

Fig. 1 Visual guiding system of primary optical path

卡塞格林系统的焦距为 5 m,主光路目视导星系统的组合焦距为 4.68 m,相对孔径 1/7.8。该望远镜的视场 30',出瞳直径 5.17 mm,出瞳距 24.5 mm。

3 液晶自适应系统光学设计

3.1 设计目标及考虑

长春人造卫星观测站的激光测距仪视场为 30',但是自适应光学系统由于受到大气等晕角的限制,视场一般都在角秒量级。大气等晕角为^[13]

$$\theta = 0.62r_0/h, \quad (1)$$

式中 r_0 为大气相干长度, h 为湍流层相对于望远镜的高度。长春地区的大气相干长度一般在 8~10 cm,假设 $h = 3.1$ km,则等晕角为 3~4"。因此,只需要利用激光测距仪的小视场进行自适应校正成像。如果以等晕角作为激光测距仪的视场,根据孔径的缩束比反比于视场比以及望远镜 5.17 mm 的出瞳,可以

计算出瞳处的视场角为 8'。该出瞳同时也是自适应系统的入瞳,因此自适应系统的视场应大于 8'。自适应光学系统的哈特曼探测器的最大视场为 1.2°,口径 3 mm,据此可求得自适应光学系统入瞳处的视场为 42',远大于等晕角限制的视场,因此满足要求。

激光测距仪的设计波段为可见光波段,自适应光学系统也采用该波段。但是,由于弯月镜对 532 nm 处窄带全反,导致透射的光被分成两个子波段。考虑到液晶的色散效应,其只能对窄波段进行校正。因此,采用 600~700 nm 波段进行校正成像,同时为了保证哈特曼探测器的探测能量,对整个可见波段进行探测。

自适应光学系统主要用于对卫星的实时校正观测,以验证液晶自适应光学的应用能力。由于液晶波前校正器仅对线偏振光能够有效校正^[14],因此该系统是一个偏振光系统。同时还要求窄带成像,因此还需要带通滤波。此外,还要求该系统为一个闭环校正系统。

3.2 系统设计

设计的液晶闭环自适应光学系统如图 2。从激光测距仪目视系统出来的平行光经反射镜 1 反射,再经双胶合透镜 1,2 使激光测距仪出瞳和倾斜镜共轭。该束平行光经偏振分光棱镜后变为线偏振光,

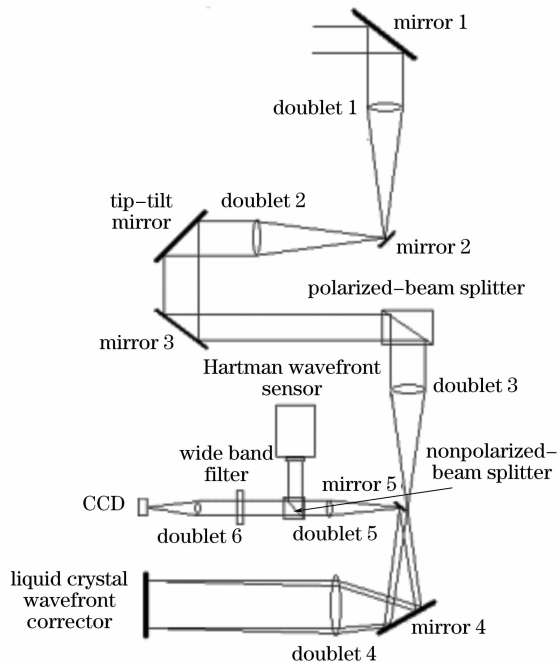


图 2 液晶自适应光学系统光路图

Fig. 2 Optical layout of the liquid crystal adaptive optical system

然后被双胶合透镜 3,4 组成的扩束系统扩束后入射到液晶波前校正器上。液晶波前校正器小角度倾斜放置,使得反射光经双胶合透镜 4 后与入射光在反射镜 5 处彻底分离。分离的反射光经双胶合透镜 5 后变为平行光,并被消偏振分光棱镜分成两路,一路进入哈特曼探测器进行波前探测,另一路经带通滤光片和双胶合透镜 6 后成像在 CCD 面板上。这样哈特曼探测器对全波段进行探测,而成像 CCD 接收到的是经带宽 100 nm 滤光片滤过的光束。

4 自适应系统光学性能评价

利用 Zemax 光学设计软件进行系统的设计和优化,以成像光路为基准进行系统评价。设计选取的波长为 F、D、C。系统的光学传递函数如图 3 所示,可见系统调制传递函数几乎与系统衍射极限传递函数重合。系统的光程差(OPD)像差曲线如图 4 所示,最大范围为±0.2λ,λ为波长, P_y, P_x 分别为系统在 x, y 方向上的归一化光瞳半径。可见,该系统的像

差非常小,这说明系统的光学性能良好。图 5 是成像系统的点列图,外围的实线圆为艾里斑。可见,0°视场的点列图均方根(RMS)半径为 9.932 μm,几何半径为 18.931 μm。而 0.7°视场的点列图均方根半径为 7.541 μm,几何半径为 17.025 μm。

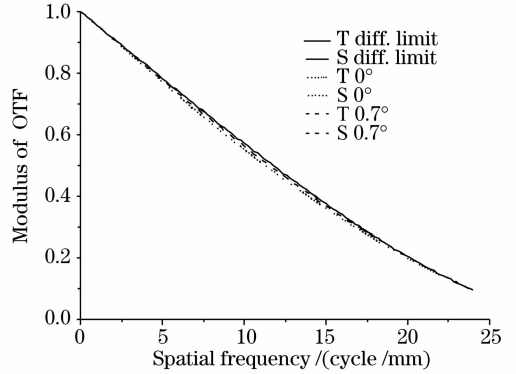


图 3 液晶自适应光学系统的调制传递函数
Fig. 3 Modulation transfer function of the liquid crystal adaptive optical system

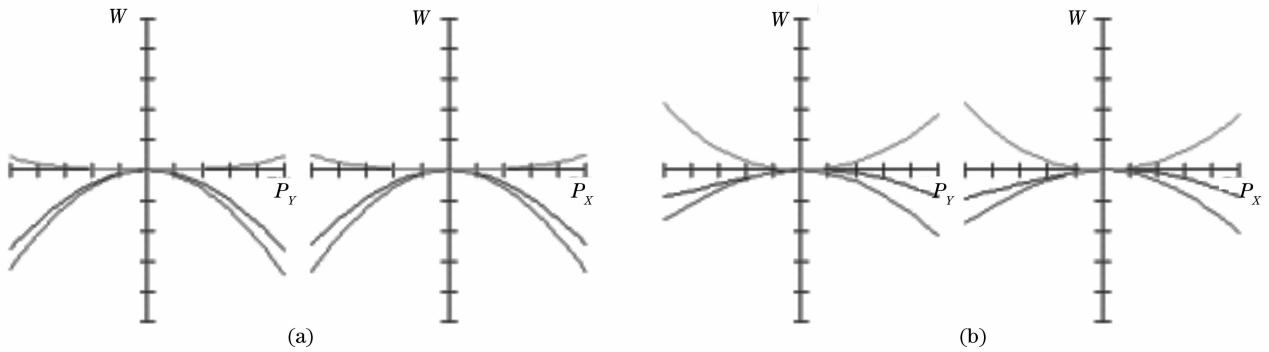


图 4 光程差像差曲线。(a) 0°视场, (b) 0.7°视场
Fig. 4 Curve of the optical path difference aberration for field of view. (a) 0°, (b) 0.7°

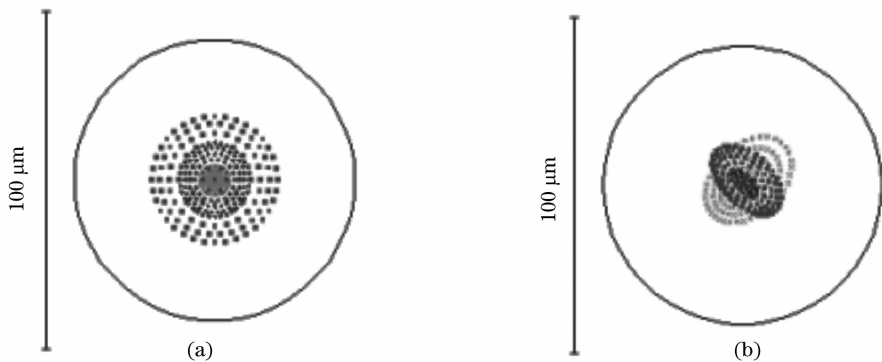


图 5 成像系统的点列图。(a) 0°视场, (b) 0.7°视场
Fig. 5 Spot diagram of imaging system for field of view. (a) 0°, (b) 0.7°

设计出的自适应光学系统焦距为 300 mm, F 数为 58。由于望远镜的出口处为平行光,因此加上自适应光学系统后整个光学系统的焦距为 35 m。在

像面上系统的衍射极限分辨力为

$$D = 1.22\lambda F / \# \tag{2}$$

式中 λ 为波长。如果取 $\lambda = 633 \text{ nm}$,则可以计算出

其在像面处的线分辨力为 $44.8 \mu\text{m}$, 成像 CCD 的像元尺寸为 $16 \mu\text{m}$, 为 2.8 倍采样, 满足采样定理。因此可以认为该自适应系统性能优良, 设计合理, 满足应用要求。

5 公差分析

利用 Zemax 设计软件对该光学系统进行了公差分析, 给定公差参量见表 1。

表 1 公差参量

Table 1 Tolerance parameters

Radius /mm	± 0.1
Thickness /mm	± 0.2
Decenter X (surface) /mm	± 0.1
Decenter Y (surface) /mm	± 0.1
Tilt X (surface) /($^{\circ}$)	± 0.05
Tilt Y (surface) /($^{\circ}$)	± 0.05
Decenter X (element) /mm	± 0.1
Decenter Y (element) /mm	± 0.1
Tilt X (element) /($^{\circ}$)	± 0.2
Tilt Y (element) /($^{\circ}$)	± 0.2

根据设定的公差参量, 利用 Zemax 软件的灵敏度分析模式进行公差分析。结果显示, 在该公差条件下, 系统的均方根波前误差从 0.025λ 变到 0.033λ , 最大变化量为 0.008λ , 说明该光学系统在该公差条件下可以使用。该公差条件非常宽松, 可以非常容易实现。因此, 光学系统具备宽松的公差条件, 可以很容易地实现加工和装调。

6 结 论

根据液晶的特点以及 600 mm 望远镜的系统参量, 利用 Zemax 光学设计软件进行自适应光学系统的设计与优化。设计出的自适应光学系统的焦距为 300 mm, F 数为 58, 与望远镜匹配后整个系统焦距为 35 m。整个光学系统在像面处的极限线分辨力为 $44.8 \mu\text{m}$ 。同时, 该系统的调制传递函数几乎与衍射极限传递函数重合, 光程差像差在 $\pm 0.2\lambda$ 范围内, 这说明设计出的系统性能优良, 同时还满足了应用要求。公差分析表明, 该自适应光学系统易实现加工和装调。

参 考 文 献

- 1 G. D. Love. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1517~1524
- 2 Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 527~530
刘永军, 胡立发, 曹召良等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 527~530
- 3 Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1686
刘永军, 宣 丽, 胡立发等. 高精度纯位相液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1686
- 4 Xinghua Wang, Bin Wang, John Pouch *et al.*. Performance evaluation of a liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(11): 2769~2774
- 5 Rensheng Dou, Michael K Giles. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid crystal television as a phase retarder[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(14): 1583~1585
- 6 Zhaoliang Cao, Quanquan Mu, Lifa Hu *et al.*. The durability of a liquid crystal modulator for use with a high power laser[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(4): 427~430
- 7 Zhaoliang Cao, Li Xuan, Lifa Hu *et al.*. Temperature effect on the diffraction efficiency of the liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(11): 69~73
- 8 Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.*. Oblique-incidence characteristic of parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 587~590
叶必卿, 陈 军, 福智昇央等. 斜入射液晶空间光调制器的特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 587~590
- 9 Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.*. Characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 374~378
叶必卿, 陈 军, 福智昇央等. 液晶空间光调制器的斜入射特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 374~378
- 10 David Dayton, John Gonglewski, Sergio Restaino *et al.*. MEMS adaptive optics for high resolution imaging of low earth orbit satellites[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5490**: 1514~1525
- 11 David Dayton, John Gonglewski, Sergio Restaino *et al.*. Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(25): 1508~1519
- 12 Yu Erhui, Shen Hongjun. The design of the optical system of the second-generation satellite laser ranging system [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1986, (8): 114~120
于尔慧, 沈洪均. 第二代人卫激光测距仪的光学系统设计[J]. *中国科学院上海天文台年刊*, 1986, (8): 114~120
- 13 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. *Theory of Adaptive Optics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 209
周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 209
- 14 Cao Zhaoliang, Hu Wusheng, Hu Lifa *et al.*. Application of the liquid crystal kinoform for optical testing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1941~1945
曹召良, 胡五生, 胡立发等. 液晶相息图用于光学检测[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1941~1945