

激光导星动态聚焦系统模拟分析及设计

邵丽娜^{1,2} 曹召良¹ 穆全全¹ 胡立发¹ 赵晶丽³ 张红胜⁴ 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中国科学院大学,北京 100049

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033

⁴中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,光栅技术实验室,吉林 长春 130033

摘要 增加激光导星的散射层采样厚度可以提高波前探测器的探测能量,但是存在探测光斑弥散问题。针对该问题,分析并设计了动态聚焦系统。首先分析了采样厚度对波前探测能量的影响,结果显示,波前探测能量随着采样厚度非线性增大,当采样厚度为4 km、激光脉冲能量为10 mJ时,望远镜子孔径接收到的光子数为120,满足探测精度要求。然后分析了光斑弥散对波前探测精度的影响,当采样厚度为4 km时,波前探测误差约为 0.5λ ,探测误差较大。为了实现精确探测,依据分析结果设计了动态聚焦系统,将聚焦反射镜的移动距离由111 mm缩小到100 μm 、移动速度由4200 m/s降低到3.8 m/s,满足应用需求。最后利用Zemax软件进行优化,结果表明,对于4 km采样厚度,光学系统均能实现理想成像。

关键词 光学设计;自适应光学;动态聚焦系统;激光导星

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901006

Simulation Analysis and Design of a Dynamic Refocus System for Laser Guide Star

Shao Lina^{1,2} Cao Zhaoliang¹ Mu Quanquan¹ Hu Lifa¹ Zhao Jingli³ Zhang Hongsheng⁴
Xuan Li¹

¹State Key Laboratory of Adaptive Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

⁴Grating Technology Laboratory, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract By increasing the sample scattering layer thickness of laser guide star, the detection energy of wave-front sensor is enhanced but makes the detection spot diffused. To solve this problem, a dynamic focus system is designed. Influence of the sample thickness on the wave-front detection energy is analyzed and result shows that the wave-front detection energy increases nonlinearly with the sample thickness. When the sample thickness is 4 km with the laser pulse energy of 10 mJ, the number of received photons is 120 per sub-aperture of telescope, which meets the detection requirements. Then effect of diffusion spot on wave-front detection accuracy is analyzed, the result shows that the wave-front measurement error is about 0.5λ when the sample thickness is 4 km, which

收稿日期: 2015-03-12; 收到修改稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61205021,61475152,61377032)。

作者简介: 邵丽娜(1987—),女,博士研究生,主要从事激光导星自适应光学系统方面的研究。

E-mail: selinaciomp@126.com

导师简介: 宣 丽(1957—),女,博士,研究员,主要从事液晶自适应光学方面的研究。

E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn(通信联系人)

leads accurate detection unfeasible. In order to achieve accurate detection, dynamic focus system is designed based on the analysis results, moving distance of the focusing mirror is reduced from 111 mm to 100 μm , and moving speed from 4200 m/s to 3.8 m/s, which meet the application requirements. Zemax software optimized results show that the optical system can achieve the ideal imaging for 4km sample thickness range.

Key words optic design; adaptive optics; dynamic refocus system; laser guide star

OCIS codes 010.7060; 220.4830; 010.7350

1 引 言

大口径地基望远镜在观测空间目标时,由于大气湍流造成光学波前畸变,从而导致望远镜的分辨率急剧下降。自适应光学系统可以对湍流进行实时校正从而获得清晰成像,因而成为望远镜的必备技术^[1-5]。激光导星技术由于可以解决弱观测目标的波前探测问题而被大口径地基望远镜自适应光学系统广泛采用^[6-9]。目前在国际上,瑞利导星和钠导星都已成功应用在大口径望远镜系统上^[10-11],但是国内激光导星技术还处于研究阶段^[12-13]。

激光导星包括瑞利导星和钠导星。瑞利导星是利用脉冲激光器向空中发射,当脉冲经过大气时,在 10~20 km 高度处大气中氮和氢分子产生瑞利后向散射,利用哈特曼探测器探测后向散射的光,实现大气湍流畸变信息的探测^[14]。由于须对特定高度范围内进行曝光探测,因此需要控制哈特曼波前探测器的曝光时间和时刻。一般情况下,控制曝光时刻使其在特定高度处开始曝光,控制曝光时间使得采样厚度为 1~2 km。通过增加采样厚度的方法可以提高望远镜接收到的返回光子数,从而提高哈特曼波前探测器的探测能量。但是采样厚度受系统景深的限制,当采样厚度过大时,超出系统景深会导致波前探测器上的光斑弥散,导致探测误差加大^[15]。此外,对于钠导星也存在采样厚度增加带来的光斑弥散问题^[16]。为了解决该问题,美国 J. A. Georges III 在 2000 年提出动态聚焦(DR)概念:通过实时移动聚焦反射镜来使不同高度的光都聚焦在像面上^[17-20]。动态聚焦方法为解决增加激光导星采样厚度带来的光斑弥散问题提供了可能性。

本文依据国家天文台 2.16 m 望远镜和瑞利导星的工作原理,研究了采样厚度对波前探测能量和探测精度的影响,并做出定量分析。最后以瑞利导星为例,进行动态聚焦系统的设计,为从事激光导星系统设计的研究者提供设计思路和依据。

2 采样厚度对波前探测影响

2.1 瑞利导星工作原理

瑞利导星的工作原理如图 1 所示,脉冲激光器产生激光脉冲,该脉冲光通过望远镜主镜发射到空中,且在 10~20 km 高度范围内聚焦;该聚焦光会产生较强的后向散射,后向散射光被望远镜接收后,进入自适应光学系统中的哈特曼探测器进行波前探测。由于激光器发射的是一个激光脉冲,该脉冲光在空中传播时就相当于一个一定长度的光柱在向上飞行。为了实现聚焦附近的较强后向散射光进行接收,需要利用哈特曼探测器的快门,控制其在脉冲传播到聚焦位置附近时开启、远离聚焦位置时关闭。在开启到关闭这段时间内光走过的距离即为采样厚度,如图 1 所示。

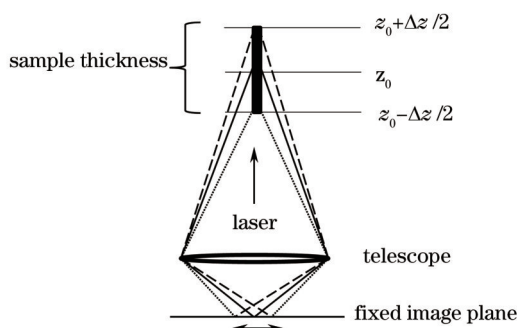


图 1 瑞利导星产生原理

Fig.1 Principle of Rayleigh guide star

2.2 采样厚度对波前探测能量的影响

哈特曼探测器接收的光子数和采样厚度相关^[18]:

$$N = \left(\frac{E\lambda}{hc}\right) \times [\sigma_B n(z)\Delta z] \times \left(\frac{A_R}{4\pi z_0^2}\right) \times (T_0 T_a \eta), \quad (1)$$

式中 N 为探测器接收到的光子数; E 为激光器脉冲能量, 单位为 J; λ 为激光器的发射波长, 单位 m; h 为普朗克常量, 为 6.626×10^{-34} J·s; c 为光速, 为 3×10^8 m/s; σ_B 为有效后向散射截面, 单位为 m^2 ; $n(z)$ 为在高度 z 处散射数密度, 单位 m^{-3} ; Δz 为采样厚度, 单位 m; A_R 为望远镜的接收面积, 单位 m^2 ; z_0 为瑞利导星束腰位置, 单位 m; T_0 为光学系统的透射率; T_a 为大气透射率; η 为探测器的电荷耦合器件 (CCD) 量子效率。其中:

$$\sigma_B n(z) = 3.6 \times 10^{-31} \frac{P(z)}{T(z)} \lambda^{-4.0117}, \quad (2)$$

式中 P 代表大气压强, 单位为 kPa; T 代表温度, 单位为 K。

设瑞利激光导星聚焦在 $z_0 = 13$ km 处, 激光波长 $\lambda = 550$ nm, $T_0 = 0.3$, $T_a = 0.6$, $\eta = 0.8$; 对于 2.16 m 望远镜, 其接收面积 $A_R = \pi \times (2.16/2)^2$; 在《标准大气 (美国, 1976)》中给出不同海拔高度的压强值和温度值。根据 (1) 式和 (2) 式计算望远镜接收光子数与采样厚度和发射激光的脉冲能量的关系, 如图 2 所示。从图中可以看出, 望远镜接收到的光子数随着采样厚度增加成非线性增长, 随激光器脉冲能量的增加而线性幅度增长。例如在脉冲激光器能量为 10 mJ 时, 采样厚度从 1 km 增加到 10 km 时, 望远镜接收光子数从 1.39×10^4 增加到 1.69×10^5 个, 光子数增大了约 12.16 倍。如果望远镜子孔径大小为 10 cm 时, 则哈特曼波前探测器微透镜个数至少需要 $(2.16/0.1)^2 \approx 467$ 个。采样厚度从 1 km 增加到 10 km 时, 哈特曼波前探测器每个微透镜接收的光子数约从 30 个增加到 364 个。可以看出, 通过增加采样厚度的方法可以提高哈特曼波前探测器的探测能量; 同时还可以得出以下结论, 在望远镜接收到的光子数能够满足探测器能量要求时, 可以通过增加采样厚度降低脉冲激光器能量。

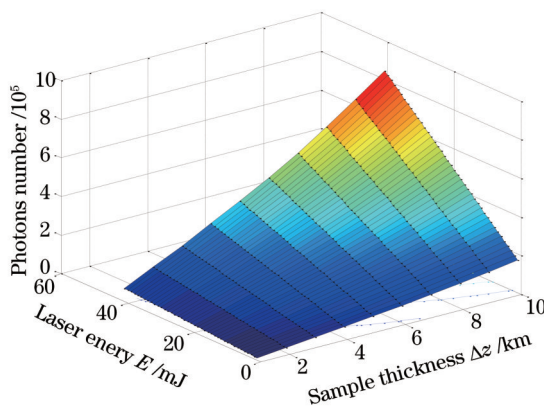


图 2 采样厚度和激光脉冲能量对接收光子数目的影响

Fig.2 Effect of sample thickness and laser energy on the photons number

2.3 采样厚度对波前探测精度的影响

哈特曼探测器的波前探测误差主要包括有限信噪比引起的波前倾斜测量误差 φ_1 和未被探测高阶像差引起的波前误差 φ_2 。当哈特曼的子孔径直径和大气相干长度相等时, 哈特曼探测器的探测误差表达式如下^[21]:

$$\varphi = \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} = \sqrt{\left(\frac{0.153\lambda K_B}{R}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{17.4}\right)^2}, \quad (3)$$

式中 λ 表示探测波长; K_B 为比例因子, 一般取 1.35~1.5; R 表示信噪比, 其表达式为:

$$R_{\text{withoutGain}} = \frac{m}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_d^2 + \sigma_r^2}}, \quad (4)$$

式中 m 表示哈特曼探测器每个子孔径内接收的光子数; σ_d^2 表示暗电流噪声; σ_r^2 表示读出噪声; σ_p^2 表示光子散粒噪声, 可以表示为 $\sigma_p^2 = m$ 。为了抑制 EMCCD 相机的暗电流噪声和读出噪声, 相机使用增益时, (4) 式信噪比公式可以表示为^[22]

$$R_{\text{withGain}} = \frac{m}{\sqrt{F^2 \sigma_p^2 + \sigma_d^2 + \frac{\sigma_r^2}{M^2}}}, \quad (5)$$

式中 M^2 为增益因子; F^2 为使用增益后引起噪声变化因子, 一般取 $\sqrt{2}$; 由于使用增益后, 相机的暗电流和读出噪声可以被忽略, 因此(5)式可以简化为:

$$R_{\text{withGain}} = \sqrt{m/2}, \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 望远镜接收的光子数直接影响哈特曼探测器的信噪比, 从而影响探测精度。而采样厚度直接影响望远镜的接收能量。因而可以通过增加采样厚度来提高望远镜的接收能量, 从而提高哈特曼探测器的探测精度。根据(6)式和(3)式, 计算出不同子孔径光子数和哈特曼探测器探测误差关系(这里 $K_H=1.35$), 如图3所示。从图中可以看出, 随着光子数的增加, 探测误差逐渐减小。理论上当光子数为100时, 总波前残差约为 0.0645λ , 小于 $\lambda/14(0.0714 \lambda)$ 的理想光学系统要求。考虑到一般 CCD 探测器的量子效率在 $0.8\sim 0.85$ 之间, 即实际所需光子数为 $118\sim 125$ 之间。因此, 每个子孔径接收到光子数为120为例进行设计和计算。

当子孔径内光子数目满足哈特曼波前探测精度要求时, 即子孔径内光子数为120时, 激光器能量随采样厚度的变化曲线如图4所示。从图4可以得出, 采样厚度从1 km 变到10 km 时, 所需激光器的脉冲能量从约40 mJ 降至3.25 mJ。由于脉冲激光器的重复频率至少与波前探测器的工作频率一致, 一般哈特曼波前探测的工作频率为1 kHz。而国内在该重复频率下的脉冲激光器能量一般仅在10 mJ 左右。从图4可以看出, 在满足哈特曼波前探测器探测精度要求时, 对瑞利激光导星的采样厚度至少在4 km 以上。

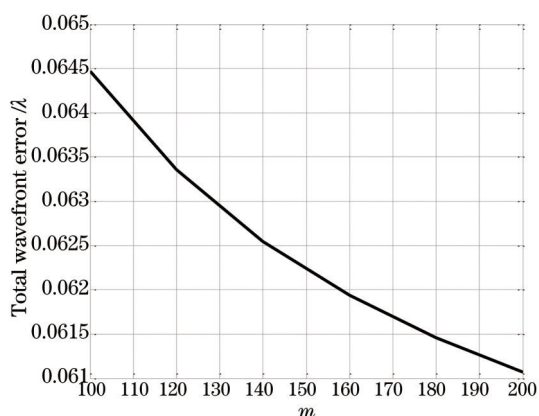


图3 子孔径接收光子数对波前探测残差的影响

Fig.3 Effect of photons per sub-aperture on wave-front error

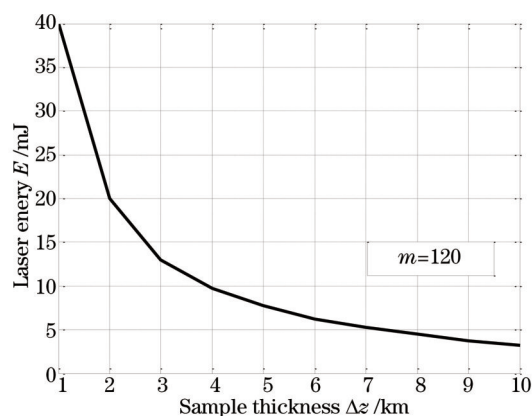


图4 采样厚度和激光器能量的关系

Fig.4 Relations of sample thickness and laser energy

但是对于固定的光学系统, 其景深也一定。当采样厚度超过景深时, 会对波前探测精度产生影响。光学系统的景深可以表示为^[23]:

$$\Delta = \frac{4ap^2 \varepsilon}{4a^2 - p^2 \varepsilon^2}, \quad (7)$$

式中 a 代表入瞳半径, p 代表物面距入瞳中心距离, ε 代表极限分辨角。对于望远镜系统, 其衍射极限分辨角由大气相干长度决定, 计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{1.22\lambda}{r_0}, \quad (8)$$

式中 λ 为波长, r_0 为大气相干长度。

对于瑞利激光导星, $p=z_0=13 \text{ km}$, $a=1.08 \text{ m}$, 设 r_0 为 10 cm , 则由(7)式和(8)式计算得出 2.16 m 望远镜的景深约为 1 km , 即采样范围在 $12.5\sim 13.5 \text{ km}$ 时, 其对望远镜的成像分辨率没有影响。当采样范围超过 $12.5\sim 13.5 \text{ km}$ 时, 便在望远镜像面处产生弥散斑。哈特曼探测器超过 1 km 的采样范围进行采样时, 可以看作是各个高度成像的叠加, 且弥散斑直径随着采样厚度增加而增大。假设激光器脉冲能量为 10 mJ 时, 在不同采样厚度下, 弥散斑对波前探测精度影响的计算结果如图5所示。可以看出, 由弥散斑引起的波前探测误差随着弥散斑增大而成上升趋势, 在 4 km 采样厚度处, 波前探测误差为 0.5λ 。因此当采样厚度增加时, 虽然可以提高波前探测器的

接收能量,但是由于弥散斑的存在,却降低了波前探测精度。因此,需要利用动态聚焦系统,随着采样高度的变化,实时聚焦,从而消除弥散斑。这样,既可以获得较高的接收能量,同时还保证了哈特曼探测器的探测精度。

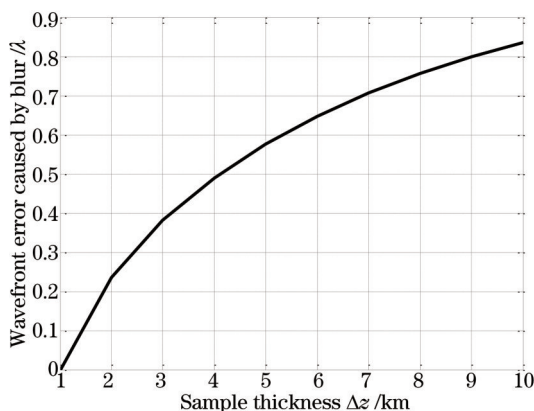


图5 弥散斑对波前探测误差的影响

Fig.5 Effect of blur on wave-front measurement error

3 动态聚焦系统设计

3.1 工作原理

动态聚焦系统的工作原理如图6所示,望远镜接收激光导星后向散射的光,经过反射镜反射后进入哈特曼波前探测器。激光脉冲在大气中向上传播过程中,后向散射光的高度也逐渐升高,导致激光导星无法在望远镜像面上进行成像。为了使不同高度的后向散射光都能聚焦在望远镜焦面上,需要控制聚焦反射镜前后移动,使的反射光能够聚焦在同一个像面,然后再进入哈特曼波前探测器进行波前探测。

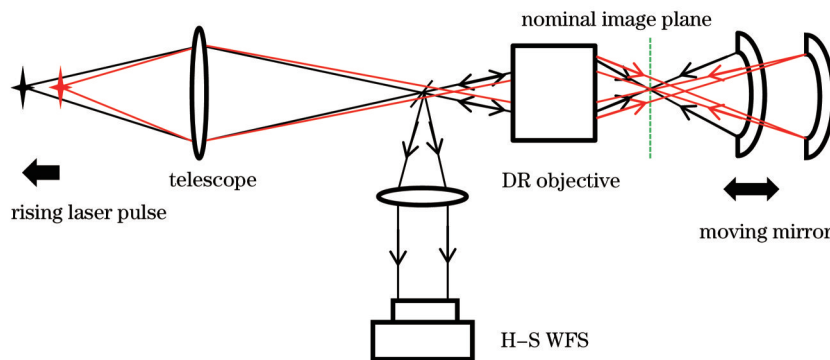


图6 动态聚焦系统工作原理图

Fig.6 Schematic layout of dynamic refocus system

在图6中,聚焦反射镜的作用是减小像面变化量来减小反射镜的移动速度。根据高斯光学成像公式,聚焦反射镜的轴向移动量可用下式计算:

$$\Delta z' = \frac{1}{2} \times \frac{|z_1 - z_2| \times f_c^2}{f_c^2 - (z_1 + z_2) \times f_c + z_1 \times z_2}, \quad (9)$$

式中 z_1, z_2 分别表示哈特曼探测器曝光开始和结束时激光脉冲的位置, f_c 代表系统的等效焦距。把 z_1, z_2 变换成束腰位置 z_0 和采样厚度 Δz 的表示方法: $z_1 = z_0 - \Delta z/2, z_2 = z_0 + \Delta z/2$, 代入(9)式后得

$$\Delta z' = \frac{\Delta z \times f_c^2}{2 \left(f_c^2 - 2z_0 f_c + z_0^2 + \frac{\Delta z^2}{4} \right)}. \quad (10)$$

因为 $\Delta z^2/4 \ll z_0^2$ 且 $f_c \ll z_0$, (10)式近似变为:

$$\Delta z' \approx \frac{\Delta z \times f_c^2}{2z_0^2}. \quad (11)$$

根据(11)式可以看出,聚焦反射镜的移动距离和系统的等效焦距的平方以及采样厚度成正比、和采样中心位置的平方成反比。在采样厚度一定时,聚焦反射镜移动的距离越小,其移动速度就可以越慢。因此在光学设计时,要通过尽量减小系统的焦距、增加采样中心高度来减小聚焦反射镜的移动距离。当采样厚度和采样中心高度确定后,可以依据(11)式,通过设计合理的焦距,来获得较短的移动距离,以降低聚焦反射镜的移动速度。对于2.16 m望远镜,焦距 $f_e=97.2$ m;根据2.3节内容,选取采样厚度 $\Delta z=4$ km,聚焦位置 $z_0=13$ km,当没有放置物镜时,根据(11)式可以计算出聚焦反射镜需要移动111 mm。为了计算聚焦反射镜的移动速度,需要计算激光在4 km采样范围内的传输时间。激光在4 km的传播时间为13.3 μ s,由于该光需要返回才能接收,因此聚焦反射镜的运动时间为2倍的光束传播时间,即26.7 μ s。要求反射镜在此时间内能够运动111 mm,据此可以计算出反射镜移动速度约为4200 m/s。但是在实际应用中,能够实现高速、短距离运动的促动器为音圈驱动器,其能够实现的移动速度小于5 m/s。因此,需要通过光学设计使反射镜的移动速度从4200 m/s降低到5 m/s以下。

3.2 光学系统设计

由(11)式可以得出,当激光导星束腰位置和采样厚度为定值时,反射镜移动量和系统的有效焦距成正比。如果有效焦距变短,反射镜的移动速度也相应变慢。反射镜移动速度由4200 m/s变为5 m/s时,相应的反射镜移动量缩小840倍,根据(11)式得出有效焦距需要缩短为3.4 m。设计中选取有效焦距为3 m。为了实现该有效焦距,需要在望远镜焦面后的光路中放置物镜。

该光学系统的特别之处在于需要对超过系统景深的光也能够完美成像,即对11~15 km高度范围内的光都能够完美成像,此功能需要利用动态调焦系统来实现。依据物镜的焦距以及动态调焦要求,设计动态聚焦光学系统如图7(a)所示,在15、13、11 km三个不同高度的瑞利导星经过望远镜成像后,位于不同的焦平面,经过设计的动态聚焦系统后,将光束都成像在13 km高度的像面处。为了实现在13 km高度像面的准确聚焦,要求反射镜的移动量为100 μ m,平均速度为3.8 m/s,该设计结果满足反射镜移动速度小于5 m/s的要求。

在13 km高度的成像面处放置一个场镜,其作用是来控制动态聚焦系统的口径。将望远镜的孔径成像到动态聚焦光学系统附近,可以使动态聚焦光学系统以适当的口径将望远镜的所有光进入动态聚焦系统。

图7(b)为动态聚焦系统的结构图,包括聚焦物镜、场镜和动态聚焦反射镜。聚焦物镜由两片镜组成,等效于一个短焦透镜,其有效焦距为12 mm,聚焦物镜和望远镜组合的有效焦距为3 m,与上文理论计算结果一致,反射镜移动速度为3.8 m/s,满足小于5 m/s的设计条件。为了使光束经过反射镜后能够原路返回,需要使反射镜与聚焦物镜的数值孔径相匹配,即反射镜曲率中心与聚焦物镜像面中心位置相重合,满足设计要求的动态聚焦反射镜半径为11.978 mm。最后为了确保望远镜和反射镜二者的孔径共轭关系,在聚焦物镜的焦点处放置一场镜,其作用是将望远镜的孔径面成像在反射镜的口径处同时不改变原光线传播方向。依据该设计,利用Zemax光学软件进行设计优化,光学设计参数见表1。

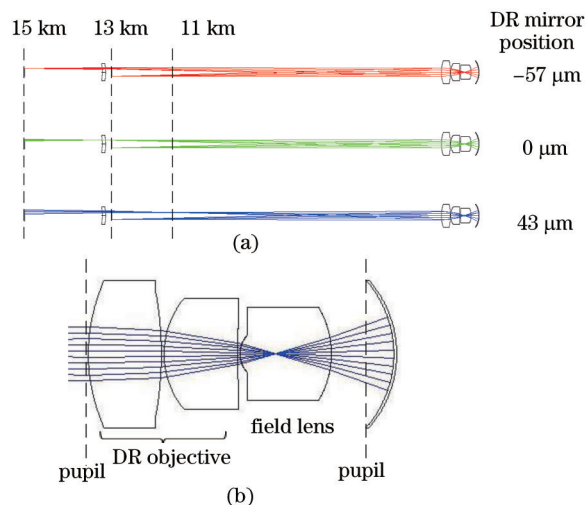


图7 光学设计模型。(a)不同共轭位置的系统结构;(b)动态聚焦系统结构

Fig.7 Model of designed optics. (a) Different conjugated optical system structure; (b) DR system structure

表 1 动态调焦光学系统参数

Table 1 Parameters of DR optics system

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter	Conic
OBJ	Standard	LGS	Infinity	$1.1 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^7$		226.893	0
STO	Paraxial		Infinity	9.72×10^4		1080	0
4	Standard	13km Focus	Infinity	761.751		9.472	0
5	Standard	DR Field lens	-29.466	3	SF6	6.192	0
6	Standard		-27.421	300		6.486	0
7	Even asphere	Obj. L1	17.633	8	BK7	8	-1.289
8	Standard		-36.503	0.3		7	0
9	Standard	Obj.L2	9.342	8	BK7	6	0
10	Standard		43.851	0.3		3	0
11	Standard	Obj. Field lens	2.968	10	BK7	2	0
12	Standard		-9.704	6.853		5	0
13	Standard	Mirror	-11.978	-6.91~-6.81	Mirror	8	6.778×10^{-6}

Ps: Surface 7: $\alpha_1 = -2.713 \times 10^{-4}$, $\alpha_2 = -2.574 \times 10^{-7}$; α_1, α_2 represent coefficient of r^2 and r^4 , r is radius of the lens.

3.3 结果评价

由于系统景深为 1 km, 优化过程中将 4 km 采样厚度的每间隔 1 km 共轭位置进行优化。该光学系统各个共轭位置的点列图如图 8 所示, 图上的外围实线为艾里斑, 可以看出系统在各个位置的成像光斑均小于艾里斑, 即为理想成像光学系统。

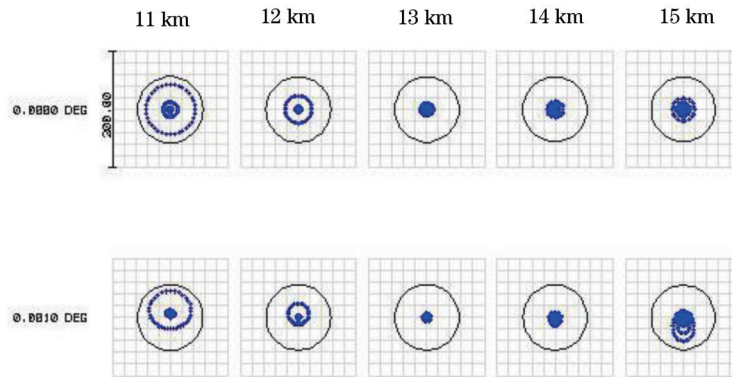


图 8 动态聚焦系统点列图

Fig.8 Spot diagram of DR system

图 9 为其传递函数曲线, 均接近衍射极限, 可以认为是理想的光学系统。光束经过该系统动态聚焦后, 能保证对哈特曼波前探测器 CCD 上的质心位置不会造成影响。对于 4 km 的采样厚度, 经过动态聚焦系统后, 反射镜的移动量为 $100 \mu\text{m}$, 平均速度为 3.8 m/s, 满足机械上实现动态调焦条件。

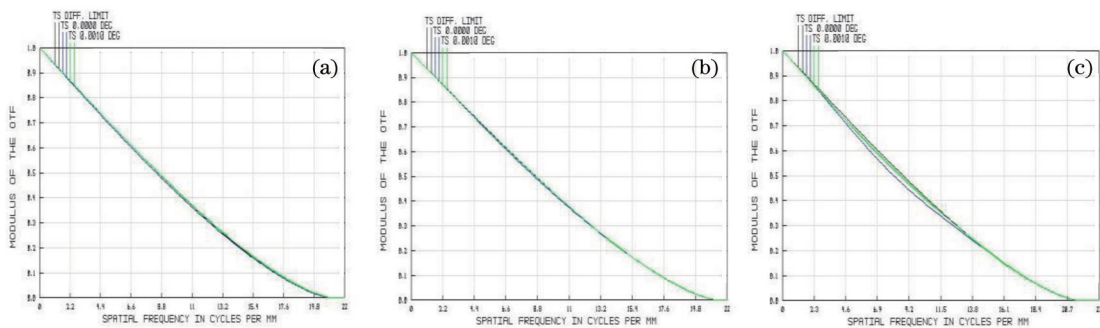


图 9 动态聚焦系统传递函数图。(a) 11 km; (b) 13 km; (c) 15 km

Fig.9 Modulation transfer function curves of DR system. (a) 11 km; (b) 13 km; (c) 15 km

4 结 论

以国家天文台 2.16 m 望远镜为例,研究了激光导星系统的分析和设计。首先分析了瑞利导星采样厚度对波前探测能量的影响,结果显示,接收光子数和采样厚度、脉冲激光器能量呈非线性关系。研究结果表明,可以通过增加采样厚度来降低脉冲激光器的能量。当望远镜每个子孔径有 120 个接收光子数时,对于 10 mJ 的脉冲激光器,所需的采样厚度为 4 km。然后分析了采样厚度超过系统景深时,弥散斑对波前探测精度的影响。计算结果显示,当采样厚度从 1 km 增加到 10 km 时,弥散斑使波前探测误差非线性增长到 0.84λ ;当采样厚度为 4 km 时,波前探测误差约为 0.5λ 。为了解决增加采样厚度产生的弥散斑问题,以 2.16 米望远镜为例,针对采样范围 11~15 km,分析并设计了动态聚焦系统,采用动态聚焦反射镜的实时移动来消除弥散斑。设计结果显示,利用聚焦物镜使 111 mm 的离焦量缩小为 $100 \mu\text{m}$,且聚焦反射镜移动速度由 4200 m/s 降低为 3.8 m/s,满足实际使用需求。最后,利用 Zemax 软件对该系统进行优化,结果表明,该系统在波长 550 nm、8" 视场内,都能够对 11~15 km 范围内的不同位置实现理想成像。该研究成果也可以应用在钠导星系统设计。总之,研究成果为激光导星的应用提供理论分析和系统设计基础。

参 考 文 献

- 1 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301002.
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301002.
- 2 Jiang Wenhao, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, chinese academy and sciences[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900106.
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
- 3 Wang Chongchong, Hu Lifa, He Bin, *et al.*. Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1113001.
王冲冲, 胡立发, 何 斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1113001.
- 4 Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Zou Yongchao, *et al.*. Study of aberration correction on light path of adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1214002.
蒋鹏志, 马浩统, 邹永超, 等. 自适应光学系统内光路的像差校正研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1214002.
- 5 Li Bangming, Li Changwei, Zhang Sijiong. Dynamic optimization method for modal control of adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0401005.
李邦明, 李常伟, 张思炯. 自适应光学系统模式控制动态优化方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0401005.
- 6 R Q Fugate, B L Ellerbroek, C H Higgins, *et al.*. Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the starfire optical range[J]. O S Am, 1994, 11(1): 310-324.
- 7 L A Thompson, S W Teare. Rayleigh laser guide star systems: application to the university of illinois seeing improvement system[J]. Astronomical Society of the Pacific 2002, 114(799): 1029-1042.
- 8 N Ageorges, C Dainty. Laser Guide Star Adaptive Optics for Astronomy[M]. Netherlands: Kluwer Academic Press, 2000: 23-27.
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optics Theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1966: 327-339.
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, 1966: 327-339.
- 10 P Clark, N Bissonauth, J W O'Byrne, *et al.*. Rayleigh guide star AO demonstrator for the 4.2-m William Herschel Telescope[C]. Proceeding of SPIE, 2003, 4839: 516-523.
- 11 A H Bouchez, D Le Mignant, M A van Dam, *et al.*. Keck laser guide star adaptive optics: science verification results[C]. SPIE, 2004, 5490: 321-330.
- 12 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, Huang Jinlong, *et al.*. Design and fabrication of polarizing beam splitter in adaptive optics laser guide star system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0131002.
付秀华, 莫朝燕, 黄金龙, 等. 自适应光学激光导星系统中偏振光膜的研制[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0131002.
- 13 Liu Jie, Wang Jianli, Lv Tianyu, *et al.*. All-solid-state 589 nm laser and the brightness of excited sodium guide star[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3200-3204.
刘 杰, 王建立, 吕天宇, 等. 全固态 589 nm 激光器及其钠导星激光点亮[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3200-3204.

- 14 F Roddier. Adaptive Optics in Astronomy (1st Ed) [M]. New York: Cambridge University Press, 1999: 255–271.
- 15 B B Jeffrey. Optical Design for Extremely Large Telescope Adaptive Optics Systems[D]. Tucson: The University of Arizona, 2004: 137–140.
- 16 R Ragazzoni, M Tordi, E Diolaiti. A fixed plate to remove spherical aberration in Rayleigh laser guide stars[J]. Optics Communications, 2001, 149(4): 243–250.
- 17 C J Baranec, B J Bauman, M Lloyd–Hart. Concept for a laser guide beacon Shack–Hartmann wave–front sensor with dynamically steered subapertures[J]. Opt Lett, 2005, 30(7): 693–695.
- 18 J Augustus, A Georges III. Dynamically Refocused Rayleigh Beacons for Adaptive Optics[D]. Tucson: The University of Arizona, 2003: 43–46.
- 19 J A Georges, P Mallik, T Stalcup, *et al.*. Design and testing of a dynamic refocus system for Rayleigh laser beacons[C]. SPIE, 2003, 4839: 473–483.
- 20 J T E Stalcup, J A Georges III, M Snyder, *et al.*. Field tests of wavefront sensing with multiple Rayleigh laser guide stars and dynamic refocus[C]. SPIE, 2004, 5490: 1021–1032.
- 21 B M Welsh, C S Gardner. Performance analysis of adaptive–optics systems using laser guide stars and sensors[J]. Opt Soc Am, 1989, 6(12): 1913–1923.
- 22 Liu Chao. Study on Increasing the Correction Bandwidth of Liquid Crystal Adaptive Optics System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 57–59.
刘 超. 提高液晶自适应光学系统校正速度的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 57–59.
- 23 Yu Daoyin, Tan Hengying. Optical Engineering[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 67.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械出版社, 2006: 67.

栏目编辑: 韩 峰