

文章编号 2095-1531(2015)05-0814-09

大气色散对4 m望远镜成像分辨力的影响与校正

明名*, 吕天宇, 吴小霞, 郝亮, 赵金宇
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 本文分析研究大气色散对4 m望远镜成像系统分辨率的影响及校正方法。首先计算分析了大气色散对其成像分辨力的影响, 计算结果表明, 天顶角大于 15° 时, 大气色散开始影响系统成像分辨力, 天顶角大于 45° 时, 对系统成像分辨力有着较为严重的影响, 需要设置大气色散校正器来进行消除。本文列举了3种大气色散校正器的实现形式, 分别比较了它们的优缺点, 最后选择了胶合棱镜旋转补偿的形式来消除大气色散对4 m望远镜高分辨力成像系统的影响。基于4 m望远镜高分辨力成像系统的特点, 将大气色散校正器放置于成像元件前的平行光路中, 并利用光学设计软件对不同天顶角与大气色散校正器的旋转角度进行了仿真分析, 该大气色散校正器的最大楔角为 9.65° , 旋转精度为 $\pm 0.1^\circ$, 对系统分辨力影响为 $1/1\ 000$ 。分析结果表明, 旋转精度完全能够满足系统成像分辨力的要求, 证明本文对大气色散的影响分析和大气色散校正器的设计是有效的。

关键词: 大气色散校正器; 望远镜; 分辨力; 光学设计

中图分类号: TH75 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150805.0814

Influence of atmospheric dispersion on image resolution of 4 m telescope and correction method

MING Ming*, LÜ Tian-yu, WU Xiao-xia, HAO Liang, ZHAO Jin-yu
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
* Corresponding author, E-mail: 18987610@qq.com

Abstract: This paper counts and analyzes the effect of atmospheric dispersion on image resolution of 4 m optical telescope system. It is introduced that atmospheric dispersion will influence image resolution when the zenith angle is larger than 15° . With the zenith angle increasing, especially up to 45° , the image quality would be degraded greatly, so it is quite necessary that the atmospheric dispersion corrector (ADC) is applied to compensate atmospheric dispersion. By comparing the advantages and drawbacks of three modes for ADC: tilt mode, move mode and rotate mode, the glue prism pairs is used to eliminate the influence of atmospheric dispersion for 4 m telescope system, which would rotate with each other when the zenith angle changes. In 4 m

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-09-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2012AAXXX1003)

telescope optical system, the ADC is positioned in front of imaging elements of collimated optical layout. Then we analyze the relation between zenith angle and rotating angle of ADC. The largest wedge angle of the ADC is 9.65° , and the rotating accuracy is $\pm 0.1^\circ$, having an effect of 1/1 000 on resolution. So it is obviously concluded that the results satisfied the request of image resolution, and it is an effective way for the analysis of atmospheric dispersion and the application of ADC.

Key words: atmospheric dispersion corrector; telescope; resolution; optical design

1 引 言

地基望远镜口径越大,其成像分辨力越高^[1-3]。但随着口径的增大,望远镜分辨力开始受众多因素的影响,大气色散就是其中之一。

大气折射使得来自天体的光线穿过大气层后产生弯曲,天顶距发生变化,导致像面产生位移。对于不同波长的光线,大气折射率不同,穿过大气层后产生的弯曲也不一样,从而形成了大气色散^[4-5]。

大气色散是大气的二级效应,它随着波长的不同其折射率发生变化,它与波长、天顶距、观察纬度、温度、压力、湿度和海拔高度有关^[6-7]。

大气色散使得像面上的星像由一个点变成一条离散的光谱,能量不能集中,使原本清晰的像变得模糊。由于大气折射率随着波长的不同而不同,使得最终像面的点扩散函数在某一方向加长,远远超过该方向的衍射极限,因此成像为椭圆形,

而不是圆形^[8]。

大气色散与系统的通光口径无关,因此,当系统达到一定通光口径时,为了对目标进行自适应光学高分辨率成像,尤其是观测分辨率要求较高的目标时,必须消除大气色散的影响^[9-14]。

国外大型望远镜光学系统都对大气色散进行了分析和校正,校正方法主要有3种:

(a) 棱镜组移动校正,美国 10 m Keck 望远镜采用一对棱镜组沿光轴移动的方法来消除大气色散;

(b) 棱镜旋转校正,3.67 m AEOS 望远镜、6.5 m Magellan 望远镜、8.2 m LBT 望远镜采用两组棱镜相对旋转的方法来消除大气色散;

(c) 棱镜倾斜校正,4.2 m William-Herschel 望远镜采用了棱镜倾斜的方法来消除大气色散。

国内的 LAMOST 望远镜采用三片球面棱镜组成色散棱镜对大气色散进行校正^[15],具体参数如表 1 所示。

表 1 大口径望远镜进行大气色散补偿的参数

Tab. 1 Parameter of atmospheric dispersion compensation for large aperture telescopes

望远镜	天顶角/ $^\circ$	校正波段/ μm	校正前/ $''$	校正后/ $''$
Keck	0 ~ 60	0.31 ~ 1.1	3.7	0.11
Magellan	0 ~ 70	0.5 ~ 1	3.47	0.06
Herschel	0 ~ 60	0.75 ~ 0.95	1.66	0.076
LAMOST	-10 ~ 90	0.38 ~ 1	2.29	1.1

本文首先对大气色散进行了模型仿真分析^[16-17],分别用数学模型和光学设计软件计算并比较了同一站址的大气色散值,发现这两种计算结果是互相吻合的;随后针对 4 m 望远镜的大气色散值对分辨力的影响进行了分析,引申出了几

种消除大气色散的结构形式,并比较了它们的优缺点,最后根据 4m 望远镜的高分辨力成像要求^[18-19],设计了一种相对旋转的胶合棱镜组,作为 4 m 望远镜高分辨力成像系统的大气色散校正器,并分析了棱镜楔角和旋转控制精度对成像

分辨力的影响,结果表明该设计结果完全满足要求。胶合棱镜组的相对旋转精度为 $\pm 0.1^\circ$ 时,大气色散对4 m望远镜成像分辨力的影响为1/1 000。

2 模型仿真计算

为了分析与计算的准确性,采用两种方法来计算相应的大气色散带来的影响:

一种是采用数学模型来计算;另一种是采用ZEMAX来仿真计算大气色散。

然后将两种方法仿真计算所得的结果相比较,看它们是否互相吻合。

$$n_\lambda = 1 + 0.379 \times \frac{7.5 \times 10^{-3} p [1 + 7.5 p (0.817 - 0.0133 T) \times 10^{-9}]}{T + 273.15} \times (83.4213 + \frac{24060.3}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{159.97}{38.9 - \lambda^{-2}}) \times 10^{-6}, \quad (3)$$

式中, p 为大气压,单位为Pa; T 为摄氏温度,单位为 $^\circ\text{C}$,光波长 λ 的单位为 μm ,式(3)的适用波长范围为0.2~2.06 μm 。

根据球面三角公式,对视场中任意一颗星在时刻 t 的天顶距 Z 进行计算,有如下关系:

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t, \quad (4)$$

式中: ϕ 为观察者的地理纬度, δ 为星体的赤纬, t 为星体的时角。

以4 m望远镜为例,设其站址位置海拔 $h = 3\ 000\ \text{m}$,温度 $T = 8.5\ ^\circ\text{C}$,大气压强 $p = 1.013 \times 10^5\ \text{Pa}$,对成像波段 $\lambda_1 = 0.7\ \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.9\ \mu\text{m}$,计算分析4 m望远镜在天顶距为 60° 时的大气色散值。

首先计算不同波段的大气折射率,将上述参数代入式(3)分别计算得到:

$$n_{\lambda_1} = 1.0002821076, \quad (5)$$

$$n_{\lambda_2} = 1.0002808082, \quad (6)$$

因此,将式(5)、(6)式计算得到的结果相减得到:

$$\Delta n = 0.0000012994, \quad (7)$$

将式(7)的结果代入式(2),得到此时的大气色散值为:

2.1 数学模型计算

计算大气色散的数学模型有很多种,考虑到模型的简单性与接近性,选择了Elden模型来进行计算^[15]。

根据Elden模型描述,在天顶距小于 90° 的情况下,大气折射的近似公式如下所示:

$$\rho = Z' - Z = 206065(n - 1) \tan z, \quad (1)$$

式中: Z' 为视天顶距, Z 为真天顶距, n 为大气折射率, z 为天顶角,单位为“”。

因此,对 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的波段范围来说,其大气色散为:

$$\Delta \rho_1 - \rho_2 = 206065(n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) \tan z, \quad (2)$$

而大气折射率的计算公式为:

$$\Delta \rho = 206265 \times 0.0000012994 \times \tan 60^\circ = 0.464", \quad (8)$$

2.2 ZEMAX 软件仿真计算

为了对Elden模型的计算结果进行验证,在同样的参数下,利用ZEMAX设计软件对大气色散进行仿真计算,对4 m望远镜高分辨力成像光学系统计算得到的大气色散值为0.470”。图1是大气色散点扩散函数。

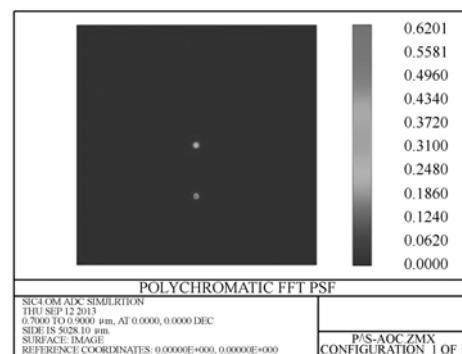


图1 ZEMAX 仿真的大气色散 PSF

Fig. 1 Emulated PSF of atmospheric dispersion

由上面的仿真可知,利用Elden数学模型计算大气产生的色散值与利用ZEMAX模拟仿真大

气色散所得到的大气色散值是几乎吻合的,其误差为0.006"。

4 m 望远镜高分辨力成像系统的成像波段为700~900 nm,中心波长为800 nm,衍射极限成像分辨力为:

$$\rho = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \times \frac{0.8}{4} \times 10^{-6} \times 206265 = 0.05", \quad (9)$$

根据仿真结果给出了天顶角为0°~75°时,大气色散对成像分辨力的影响,并与系统的衍射极限分辨力进行了比较,如图2所示。

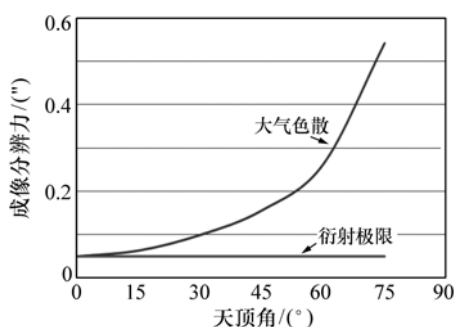


图2 大气色散与衍射极限分辨力的对比

Fig.2 Comparison of atmospheric dispersion and diffraction-limited resolution

从图中可以看出,天顶角小于10°时,大气色散对4 m 望远镜成像系统的分辨力没有影响,天顶角大于15°时,大气色散对分辨力影响较大,在天顶角45°时,大气色散为0.15",远大于0.06",需要添加大气色散校正器进行校正。

3 大气色散校正器

由第2节中的分析可以知道,大气色散与天顶距、成像波段、纬度、海拔、大气压强和相对湿度有关,与通光口径没有关系。

在一定的天顶角下,大气色散给成像分辨力带来了破坏性的影响,这种影响通过大气色散校正器来进行消除。在第一节中已经介绍了,大气色散校正器主要包括倾斜补偿校正、轴向移动补偿校正、胶合旋转补偿校正等几种形式。

3.1 倾斜补偿校正形式

图3是倾斜补偿形式的结构图,将两个棱镜放置在平行光路中,通过倾斜其中一个棱镜来消除大气色散带来的影响,另一个棱镜保持不动。

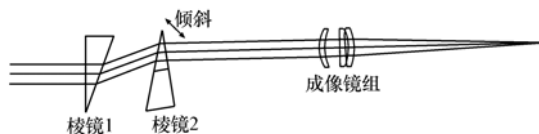


图3 倾斜补偿的结构形式

Fig.3 Structural style of tilt compensation

在这种结构形式中,两片棱镜的材料一样,选择色散值最低的材料。在分析中选取了H-ZF88,它的阿贝数仅为17.94,这样保证在不同天顶角的变化过程中,棱镜自身色散带来的影响小,而棱镜倾斜带来的色散影响大,恰好校正了由于不同天顶角带来的色散。棱镜顶角以天顶角为75°时为基准来确定,第二片棱镜倾角在天顶角为75°时为最大,为8.962°,天顶角为0°时最小,为0°。

以天顶角40°时的大气色散为例,分析了大气色散校正器对大气色散的消除情况。图4是没有添加大气色散校正器时的成像情况。

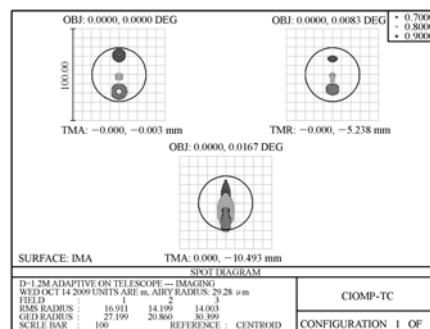


图4 大气色散未校正的点列图

Fig.4 Spot diagram with uncorrected atmospheric dispersion

图5是添加了倾斜向补偿形式的大气色散校正器后的成像情况。可以看出,大气色散没有校正时,系统成像RMS弥散斑直径最大为58.56 μm;添加大气色散校正器后,系统成像RMS弥散斑直径最大为39.23 μm,基本消除了大气色散带来的影响。

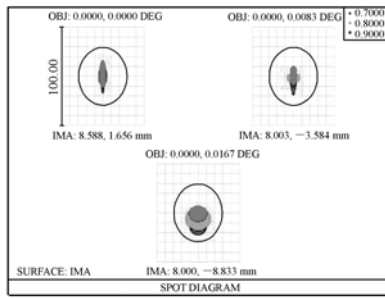


图5 校正后的系统成像点列图

Fig. 5 Corrected spot diagram with tilt compensation

这种方法的优点是只有一个元件倾斜,且行程较小,精度要求不高($\pm 1'$);缺点是天顶距在 $0^\circ \sim 75^\circ$ 之间变化时,随着棱镜的倾斜,像面位置也会随之发生变化,并且在天顶角较大时,剩余一定量的色散残差无法校正。

3.2 轴向移动补偿校正形式

图6是轴向移动补偿形式的结构图,将两个棱镜放置在成像焦点之前,在天顶距变化时通过移动棱镜轴向距离来消除色散带来的影响。

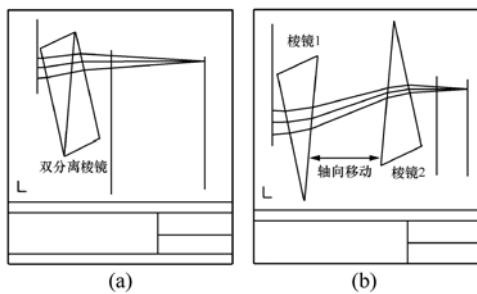


图6 轴向移动补偿的结构形式

Fig. 6 Structural style of axis-displacement compensation

图7是在天顶角 40° 时,添加了轴向移动补偿形式的大气色散校正器后的成像情况。与图4相比,大气色散校正器已经将大气色散带来的影响完全消除了。

这种方法的优点是轴向平移精度要求不高($\pm 0.1 \text{ mm}$),缺点是天顶距在 $0^\circ \sim 75^\circ$ 之间变化时,两片棱镜之间的移动范围很大,这在后截距较短的系统中难以实现。

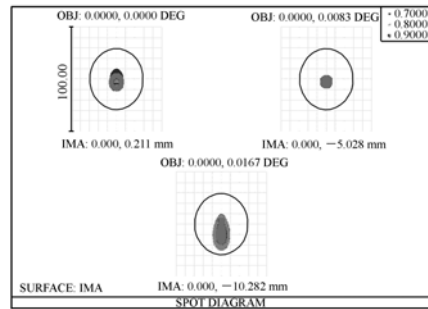


图7 校正后的系统成像点列图

Fig. 7 Corrected spot diagram with axis-displacement compensation

3.3 胶合旋转补偿形式

在这种形式中,大气色散校正器由两个完全相同的胶合棱镜组成,通过合棱镜之间的相对旋转来消除不同天顶距时大气产生的色散。

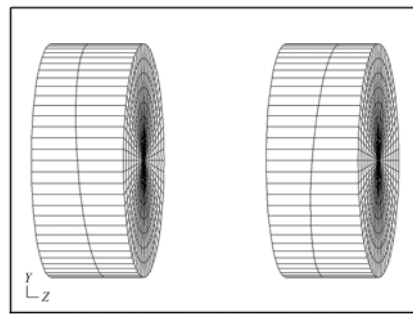


图8 胶合旋转补偿的结构形式

Fig. 8 Structural style of rotating prism pairs compensation

图8是这种大气色散校正器的结构形式。同样,以天顶角 40° 时的大气色散为例,分析了大气色散校正器对大气色散的消除情况,图9是添加了胶合旋转补偿形式的大气色散校正器后的成像情况。与图4相比,大气色散校正器已经将大气色散带来的影响完全消除了。

这种方法的优点是棱镜位置固定,旋转精度要求不高(优于 $1'$),能很好的消除大气色散带来的影响。国外大部分大型望远镜均采用这种方法来消除大气色散。

因此,将胶合旋转补偿形式作为4 m望远镜高分辨力成像光学系统大气色散校正器的结构形式。

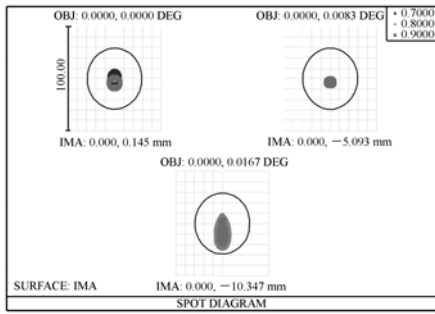


图 9 胶合棱镜旋转形式校正后的点列图

Fig. 9 Corrected spot diagram with prism pairs rotation

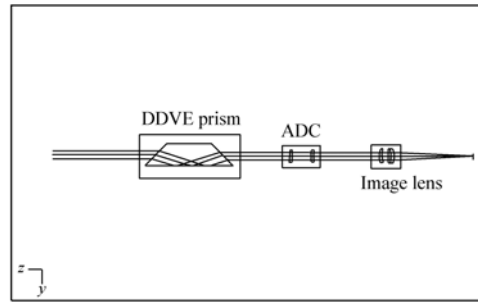


图 11 4 m 望远镜成像光学系统中的大气色散校正器

Fig. 11 ADC position in optical system of 4 m telescope

4 设计与分析

4 m 望远镜高分辨力成像系统位于塔台下方的 Coude 光学实验室中,其光学布局如图 10 所示。

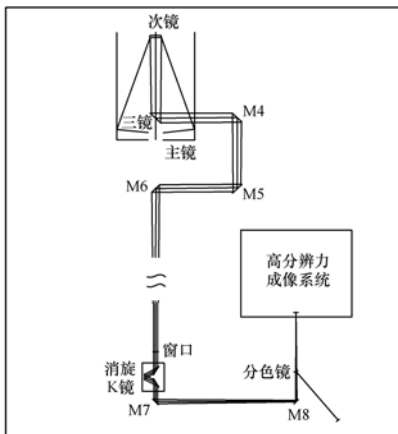


图 10 4 m 望远镜高分辨力成像系统光学布局

Fig. 10 High resolution imaging system of 4m telescope

如图 11 所示,将两片胶合棱镜放置在成像前的平行光路中,在望远镜运行的过程中,两片棱镜绕光轴向相反的方向旋转,根据不同的天顶角,来进行实时补偿,消除大气色散的影响。

由图 8 可知,大气色散校正器由两片整体为平面的胶合棱镜组成,中间的胶合面楔角用于控制整体的最大色散量。

4 m 望远镜高分辨力成像系统的成像波段为 0.7 ~ 0.9 μm,根据成像波段特点,选择了 H-F2

和 H-ZK4 这两种玻璃材料,它们的折射率曲线如图 12 所示。这两种玻璃材料具有不同的色散系数,并且在中心波长附近位置有交叉,这样可以在不影响中心波长传播方向的同时对全波段进行色散校正。

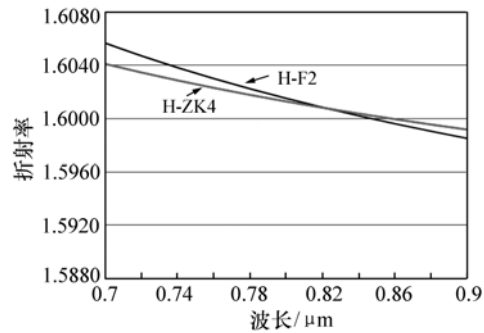


图 12 H-F2 和 H-ZK4 的折射率曲线

Fig. 12 Refractive index changes of H-F2 and H-ZK4 with wavelength

基于上面的原理,利用光学设计软件设计了色散补偿棱镜组,根据计算得到棱镜中间胶合面的楔角为 9.65°。

大气的色散大小由天顶角决定,因此,对应不同的天顶角,消色散棱镜组需要转动不同的角度进行补偿。

棱镜组的转动角度与天顶角的换算关系为:

$$\cos\theta = k \cdot \tan z, \quad (10)$$

式中:θ 为大气色散校正器中棱镜的旋转角度,z 为天顶角,k 为转换系数。以 10°为一个单位,分析了天顶角 0° ~ 75°之间,对应的棱镜旋转角度。

表1是通过zemax光学设计软件得到的不同天顶角对应不同棱镜旋转角的数值。

表2 天顶角与棱镜旋转角的对应关系
Tab.1 Relationship between zenith angle and prism rotated angle

天顶角/°	棱镜旋转角/°
0	90
10	87.314
20	84.376
30	81.029
40	76.874
50	71.176
60	62.057
70	42.225
75	0

由式(9)结合表2中的数值可以算出:

$$k = 0.271. \quad (11)$$

因此,4 m 望远镜高分辨力成像光学系统大气色散校正器的旋转角度与天顶角之间的关系为:

$$\cos\theta = 0.271 \tan\alpha. \quad (12)$$

两者的关系曲线如图13所示。

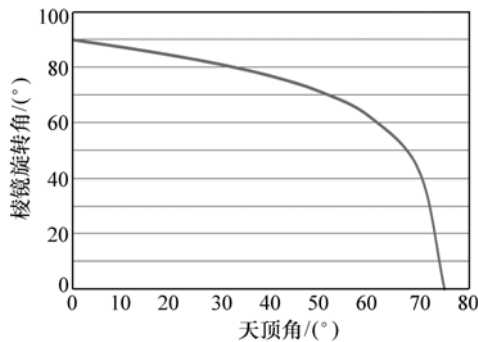


图13 棱镜旋转角度与天顶角的关系

Fig.13 Relationship between prism pairs rotation and zenith angle

利用软件仿真分析了大气色散校正棱镜组的转动精度对系统成像精度的影响,当色散校正棱镜组的转动精度为 $\pm 0.1^\circ$ 时,对系统分辨力的影响小于 $1/1000$,基本可以忽略。

图14是大气色散校正后的光学系统成像点列图。4 m 望远镜高分辨力成像系统焦距为

45 m,视场为 $1.5'$,由第2节可知校正前色散值为 $0.470''$,经过棱镜旋转校正后,系统色散最大为 $0.044''$ 。尽管依旧存在 $0.044''$ 的色散残差,但是由于该残差已经小于系统衍射极限分辨力($0.05''$),因此,不再需要继续采取其他校正措施了。

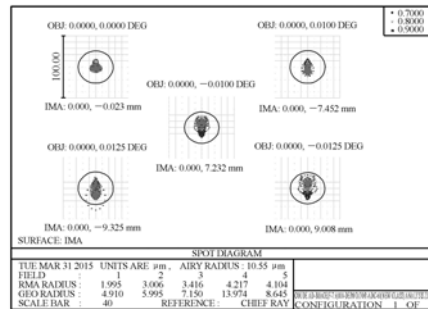


图14 大气色散校正后的系统点列图

Fig.14 Spot diagram of 4 m optical system after the correction of atmospheric dispersion

5 结论

地基大口径望远镜的分辨力总是受大气的影 响无法提高,对4 m口径的望远镜来说,大气色散是影响其成像分辨力的重要因素。本文以4 m 望远镜高分辨力成像系统为依托,首先计算分析了大气色散对其成像分辨力的影响,计算结果表明,天顶角大于 15° 时,大气色散对系统成像分辨力有着较为严重的影响,需要设置大气色散校正器来进行消除。本文列举了3种大气色散校正器的实现形式,分别比较了它们的优缺点,最后选择了胶合棱镜旋转补偿的形式来消除大气色散对4 m 望远镜高分辨力成像系统的影响。基于4 m 望远镜高分辨力成像系统的特点,将大气色散校正器放置于成像元件前的平行光路中,并利用光学设计软件对不同天顶角与大气色散校正器的旋转角度进行了仿真分析,分析表明旋转精度完全能够满足系统成像分辨力的要求,证明本文针对大气色散对4 m 望远镜成像分辨力的影响分析以及相应大气色散校正器的设计有效,能够消除大气色散对大口径望远镜成像分辨力的影响。

参考文献:

- [1] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1):1-9.
HAN CH Y. Performance optimization of electro-optical imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):1-9. (in Chinese)
- [2] 王建立, 刘欣悦. 智能光学的概念及发展[J]. 中国光学, 2013, 6(4):437-448.
WANG J L, LIU X Y. Concept and development of smart optics[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):437-448. (in Chinese)
- [3] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计[J]. 液晶与显示, 2010, 25(3):379-385.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design on compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system for telescope[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3):379-385. (in Chinese)
- [4] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4):327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)
- [5] 杨玉兰, 孙金霞, 付国柱. 主动成像系统中大气后向散射的分析和处理[J]. 液晶与显示, 2009, 24(1):126-129.
YANG Y L, SUN J X, FU G ZH. Analysis and treatment in atmosphere back-scattering of active imaging system[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(1):126-129. (in Chinese)
- [6] 韩燕, 强希文, 冯建伟, 等. 大气折射率高度分布模式及其应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2):267-271.
HAN Y, QIANG X W, FENG J W, *et al.*. Height distribution profiles and its application of atmosphere refractive index[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2):267-271. (in Chinese)
- [7] 姜宝光, 穆全全, 曹召良, 等. 液晶波前校正器校正水平方向上的大气湍流[J]. 液晶与显示, 2009, 24(3):396-398.
JIANG B G, MU Q Q, CAO ZH L, *et al.*. Correction of turbulence in horizontal direction using a liquid crystal wave-front corrector[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(3):396-398. (in Chinese)
- [8] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 大气相干长度的稳定测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4):911-918.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):911-918. (in Chinese)
- [9] PHILLIPS A C, MILLER J, COWLEY D, *et al.*. The Keck-I cassegrain ADC[J]. *SPIE*, 2008, 7014:701453-1-9.
- [10] SPANO P. A super-corrected atmospheric dispersion corrector[J]. *SPIE*, 2008, 7018:70181G-1-8.
- [11] ZHENG J, LAWRENCE J, SAUNDERS W, *et al.*. Image quality analysis of a fluid atmospheric dispersion corrector[J]. *SPIE*, 2014, 9151:91511N-1-10.
- [12] HIBON P, THOMAS S, DUNN J, *et al.*. Characterization of the atmospheric dispersion corrector of the Gemini planet imager[J]. *SPIE*, 2014, 9147:91474U-1-16.
- [13] SAUNDERS W, GILLINGHAM P, SMITH G, *et al.* Prime focus wide-field corrector designs with lossless atmospheric dispersion correction[J]. *SPIE*, 2014, 9151:91511M-1-10.
- [14] SARLOT R J, MCCARTHY D W. A cryogenic, 1-5 micron atmospheric dispersion corrector for astronomical adaptive optics[J]. *SPIE*, 2001, 4441:72-78.
- [15] 刘根荣, 袁向岩. LAMOST 望远镜的大气色散校正[J]. 天文学报, 2005, 46(3):331-342.
LIU G R, YUAN X Y. The correction of atmospheric dispersion in LAMOST[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2005, 46(3):331-342. (in Chinese)
- [16] 卫沛锋, 刘欣悦, 林旭东, 等. 自适应光学系统测试中大气湍流的时域模拟[J]. 中国光学, 2013, 6(3):371-377.
WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al.* Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):371-377. (in Chinese)
- [17] 明名, 吕天宇, 吴小霞. 二次成像形式 Coude 光学系统的设计、检测与装调[J]. 光子学报, 2014, 43(6):0622003-1-6.
MING M, LÜ T Y, WU X X. Design, measurement and alignment of a Coude optical system with reimaging[J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2014, 43(6):0622003-1-6. (in Chinese)

- [18] 卫沛锋, 刘欣悦, 林旭东, 等. 自适应光学系统校正后实际分辨率评价指标[J]. 中国光学, 2014, 7(4):672-678.
WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al.*. Evaluation index of the actual resolution after correction of adaptive optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4):672-678. (in Chinese)
- [19] 薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(8):0822005-1-6.
XUE Q SH. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for spaced-based atmospheric remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8):0822005-1-6. (in Chinese)

作者简介:



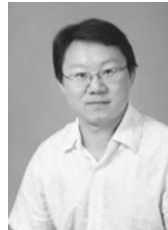
明 名(1983—), 男, 湖南临澧人, 副研究员, 主要从事大口径光学系统的设计、光学检测与装调技术等方面的研究。E-mail: 18987610@qq.com



郝 亮(1984—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事望远镜机械结构支撑等方面的研究。E-mail: 24133412@qq.com



吕天宇(1984—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事光学仪器设计等方面的研究。E-mail: lvtianyu1984@sina.com



赵金宇(1984—), 男, 内蒙古通辽人, 研究员, 主要从事地基空间目标探测设备软件设备、图像采集等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp.ac.cn



吴小霞(1981—), 女, 江苏盐城人, 副研究员, 主要从事大型光学望远镜结构支撑等方面的研究。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com