

·封面文章·

无遮拦离轴天文望远镜偏振像差分析及其对光学椭率的影响

罗敬^{1*}, 何煦¹, 范阔^{1,2}, 张晓辉¹, 董吉洪¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间三部, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着天文探测水平的提高, 偏振像差对天文望远镜成像质量的影响逐渐凸显。基于偏振光线追迹, 分析了一种用于探测宇宙弱引力透镜效应的无遮拦离轴天文望远镜的偏振像差, 得到了该望远镜的琼斯瞳、振幅响应矩阵以及望远镜中各个反射镜的二向衰减和相位延迟分布特性。计算发现偏振像差会影响该望远镜的成像对比度, 同时还会改变其点扩展函数的空间分布。计算了偏振像差对望远镜光学椭率的影响, 结果表明偏振像差会导致该望远镜光学椭率在全视场范围内发生不同程度的变化, 最大改变量为 7.5×10^{-3} , 平均改变量为 2.7×10^{-3} 。在视场 $[-0.0487^\circ, 0.155^\circ]$ 附近, 偏振像差使得该望远镜光学椭率最大插值误差由 1.2×10^{-4} 增大为 1.1×10^{-3} 。本文研究结果表明, 对于探测弱引力透镜效应等要求超高成像质量的天文望远镜, 偏振像差不可忽略, 需要进行优化设计。

关键词 成像系统; 无遮拦离轴天文望远镜; 偏振像差; 光学椭率; 点扩展函数; 弱引力透镜效应

中图分类号 O439; P111.21

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0811001

Polarization Aberrations in an Unobscured Off-Axis Astronomical Telescope and Their Effects on Optics Ellipticity

Luo Jing^{1*}, He Xu¹, Fan Kuo^{1,2}, Zhang Xiaohui¹, Dong Jihong¹

¹ Third Research Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract Because of the continuously increasing detection ability in astronomy, polarization aberrations are playing increasingly important roles in the performance of astronomical telescopes. In this paper, the polarization aberrations of an unobscured off-axis astronomical telescope used to detect weak gravitational lensing effect are analyzed using polarization ray tracing. The diattenuation map and retardance map of each mirror for the telescope are obtained, and both its Jones pupil and amplitude response matrix are determined. It is found that the polarization aberrations of the telescope have an impact on both the imaging contrast and the spatial distribution of the point spread function (PSF). The optics ellipticity of the telescope is analyzed. The variations of optics ellipticity, which are dependent on the field of view (FOV), are induced by polarization aberrations. The maximum and mean variations of the optics ellipticity in all FOVs are 7.5×10^{-3} and 2.7×10^{-3} , respectively. At the FOV $[-0.0487^\circ, 0.155^\circ]$, the maximum ellipticity interpolation error increases from 1.2×10^{-4} to 1.1×10^{-3} . Our analyses reveal that polarization aberrations should not be ignored and should be optimized in telescopes that require ultrahigh imaging performance, such as those used for detecting weak gravitational lensing effect.

Key words imaging system; unobscured off-axis astronomical telescope; polarization aberration; optics ellipticity; point spread function; weak gravitational lensing effect

OCIS codes 110.6770; 310.5448; 260.5430; 120.6085; 220.1010

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-02; 录用日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61875190)

* E-mail: luojingopt@ciomp.ac.cn

1 引 言

偏振像差表征光线经过光学系统后其振幅、相位以及偏振态的变化^[1]。若出射光与入射光的偏振态始终保持一致,光学系统的偏振特性可以用一个单位琼斯矩阵表示,该系统也被称为无偏振像差系统。然而实际光线在光学表面反射和折射时,很可能导致入射光的平行偏振分量(P光)与垂直偏振分量(S光)的振幅和相位出现差异(平行偏振和垂直偏振均相对于入射面而言),进而改变出射光的偏振态。任何偏离理想偏振特性的光学系统都存在偏振像差,偏振像差的大小与光学系统的结构特点以及镀膜特性密切相关^[1-2]。

对于成像光学系统,波像差依然是最重要的像差,其对成像质量的影响远大于偏振像差,因此在大多数应用中偏振像差可以被忽略^[2]。然而,随着光刻物镜、对地遥感、天文观测等^[3-10]的研究水平不断提高,对光学系统成像质量的要求也越来越高,偏振像差的重要性逐渐凸显。在天文观测领域,增大天文望远镜的通光口径是提高其探测水平的一种重要途径。然而受体积、质量等工程限制,大口径天文望远镜需采取更加紧凑的结构设计,这往往需要在光路中添加多个转折反射镜,如欧洲极大望远镜(E-ELT)^[11]和30 m望远镜(TMT)^[12],这将导致大角度反射,进而显著增大望远镜的偏振像差。因此,研究天文望远镜系统的偏振像差变得愈发重要。de Juan Ovelar等^[13]基于M&m仿真器系统性地分析了E-ELT望远镜非理想偏振性质对偏振测量造成的误差。偏振光学研究团队PTRWG^[14]分析了TMT的偏振像差。Breckinridge等^[2]研究了偏振像差对望远镜点扩展函数(PSF)的影响,发现偏振像差会导致两正交偏振分量的PSF不重合。

然而,上述研究均只针对同轴望远镜。离轴望远镜因可同时具备宽光谱、大视场、高成像分辨率、无中心遮拦等特性,在对地遥感、天文观测中被广泛应用。尤其在天文观测领域,离轴望远镜在抑制杂散光、增大光通量、降低散射、检测波前、设置自适应光学等方面具备明显优势^[15-16]。本课题组正在研制的无遮拦离轴天文望远镜系统,其主要科学目标之一是探测宇宙中的弱引力透镜效应。弱引力透镜效应是目前精确测量宇宙中暗物质、暗能量的重要途径^[17-18],它会使得原本在望远镜像面形成圆形衍射斑的天体和星系,具有一定椭率。因此,利用天文望远镜测量大范围天体目标的成像椭率是当前精确研

究弱引力透镜效应的有效方法^[19]。欧洲宇航局的Euclid空间望远镜^[20]、美国宇航局(NASA)的WFIRST项目^[21]等均致力于观测宇宙中的弱引力透镜效应。然而,这是一项极具挑战性的工作,原因在于弱引力透镜效应对星系成像PSF椭率的影响非常微弱,而望远镜系统自身的像差却又极易导致其光学椭率变化^[22]。因此,为满足探测弱引力透镜效应的要求,望远镜系统自身必须具有极其优越的成像特性。Zeng等^[15]设计了一种离轴望远镜,分析了其光学椭率特性,研究了几何像差对椭率的影响。然而,偏振像差对该望远镜PSF椭率的影响研究尚未开展。

本文基于偏振光线追迹,系统地分析了自行研制的无遮拦离轴天文望远镜的偏振像差。计算了该望远镜中各个反射镜的二向衰减和相位延迟分布,分析了整个系统的琼斯瞳,最终得到望远镜系统的振幅响应矩阵(ARM, \mathbf{M})。在此基础上,定量分析了偏振像差对望远镜光学椭率的影响。计算结果表明,偏振像差将改变该离轴望远镜的PSF椭率以及椭率随视场的变化特性。

2 无遮拦离轴天文望远镜的偏振像差

光学系统的偏振像差主要取决于系统结构以及光学镀膜。以自行研制的无遮拦离轴天文望远镜为分析对象,入射光波长 λ 为632.8 nm,设定各个反射镜面均镀金属铝膜,其折射率为 $n = 1.15 + 6.69i$ ^[23]。离轴望远镜的光路如图1所示,这是一个COOK型三反消像散(TMA)望远镜,系统包含4块反射镜,分别称为M1、M2、M3和M4,其中M1和M2为二次曲面,M3为自由曲面,M4为平面反射镜。该望远镜的 F 数为14,有效通光口径为2000 mm,有效视场为 $1.1^\circ \times 1^\circ$ 。该离轴望远镜系统将主要用

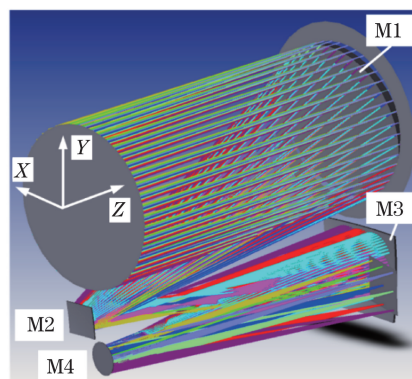


图1 无遮拦离轴天文望远镜光路图

Fig. 1 Optical layout of the unobscured off-axis telescope

于探测宇宙中的弱引力透镜效应,其光学性质经过特殊优化设计,全视场平均波像差方均根(RMS)为 $\lambda/30$,达到衍射受限水平^[15]。下面将针对该望远镜系统进行偏振像差分析以及光学椭率计算。

2.1 二向衰减和相位延迟

反射镜属于弱偏振器件。根据斯内尔定理(Snell's law),光线由真空倾斜入射到镜面并发生反射时,P光与S光的反射系数分别为

$$\begin{cases} r_p = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = |r_p| \exp(i\varphi_p) \\ r_s = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} = |r_s| \exp(i\varphi_s) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: r_p 是P光的反射系数; r_s 是S光的反射系数; n 代表反射镜折射率; θ 为入射角; φ_p 是P光的相位变化; φ_s 表示S光的相位变化。对于指定的反射镜,反射系数 r_p 和 r_s 是入射波长和入射角度的函数。二向衰减 D 用于表征P光与S光的反射率差,可以表示为^[24]

$$D = \left| \frac{|r_s|^2 - |r_p|^2}{|r_s|^2 + |r_p|^2} \right|. \quad (2)$$

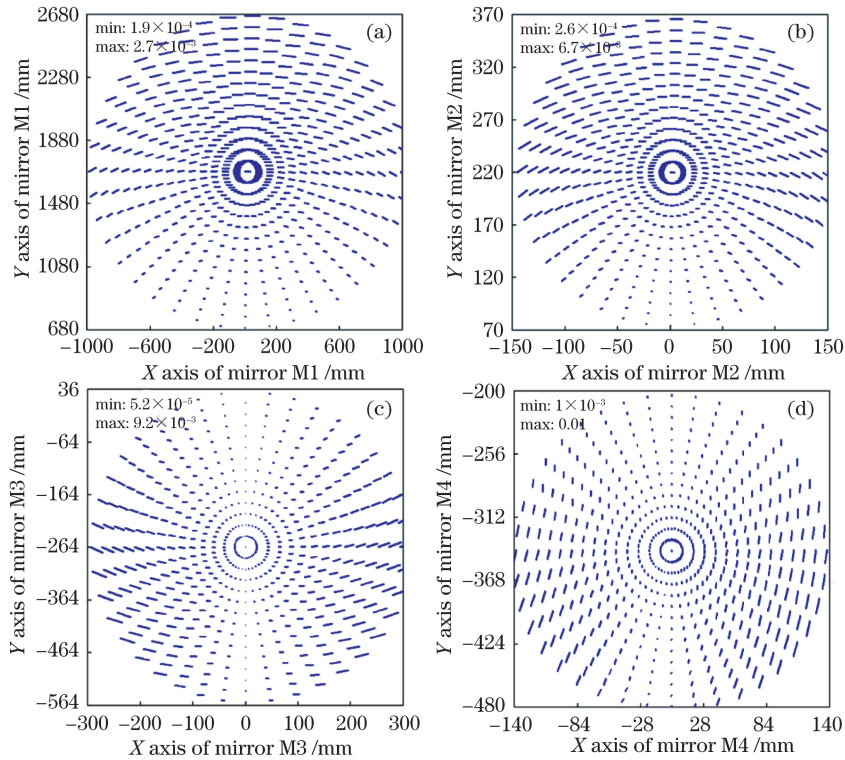


图 2 离轴天文望远镜中各个反射镜的二向衰减分布图。(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4
Fig. 2 Diattenuation maps for each mirror element in the designed unobscured off-axis telescope.
(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

S光与P光的相位差,即相位延迟 δ 为

$$\delta = |\varphi_p - \varphi_s|. \quad (3)$$

图1所示离轴望远镜中包含4块反射镜,分别是M1、M2、M3和M4。通过偏振光线追迹,计算零视场光线经过该离轴天文望远镜各个表面后的二向衰减和相位延迟分布,结果分别如图2和图3所示。

在图2所示的二向衰减图中,线段的长度表示二向衰减幅值,线段的方向表示最大透过率轴的朝向。图1所示的望远镜系统中,M1、M2、M3和M4均是离轴反射元件,而图2的计算结果也表明各个元件的二向衰减图均失去了旋转对称性,这与同轴望远镜系统存在明显差别^[2, 12]。从图2可以发现,各个反射镜的二向衰减最大值依次为 2.7×10^{-3} , 6.7×10^{-3} , 9.2×10^{-3} , 0.01。显然,除了二次曲面M1的二向衰减值明显较小外,二次曲面M2、自由曲面M3以及平面反射镜M4的二向衰减最大值比较接近。然而,在30 m望远镜等同轴系统中^[2, 12],二次曲面反射镜的二向衰减幅值明显小于 45° 转折平面反射镜,这使得30 m望远镜的二向衰减主要是由其 45° 平面反射镜决定。而本文分析的离轴系统的二向衰减则是由M2、M3以及M4共同决定。

在天文观测中,大多数星系目标均为非偏振光源^[2],故望远镜的入射光很可能是非偏振光。因望远镜系统存在二向衰减,将导致出射光不再是非偏振光,而是存在偏振度,且出射光线的偏振度等于望远镜系统的二向衰减幅值。此外,望远镜系统的二向衰减还会导致入射光的部分能量耦合到正交偏振态,造成偏振串扰,这将降低天文望远镜的成像对比度,进而对星冕仪等造成影响^[11]。

图3给出了图1望远镜中各个反射镜的相位延迟分布图,其中线段长度表示相位延迟的大小,单位是弧度(rad),线段朝向表示快轴方向。需要指出的是,图3所示的计算结果均已将几何坐标变化引起

的相位延迟剔除^[25]。相位延迟表示不同偏振光经过光学系统后,其相位变化不同,这将导致不同偏振态光线经过系统后其波像差不同。因此,对于非偏振入射光,其正交偏振分量经过望远镜后的波像差也将不同。与图2所示的二向衰减图类似,离轴望远镜中各个反射镜的相位延迟图均失去了旋转对称性。二次曲面反射镜M1和M2的相位延迟最大值分别为0.015 rad和0.03 rad,大于自由曲面反射镜M3和平面反射镜M4的相位延迟。需要指出的是,在文献[2,12]的同轴望远镜中,45°平面反射镜的相位延迟最大,这与本文离轴望远镜的计算结果明显不同。

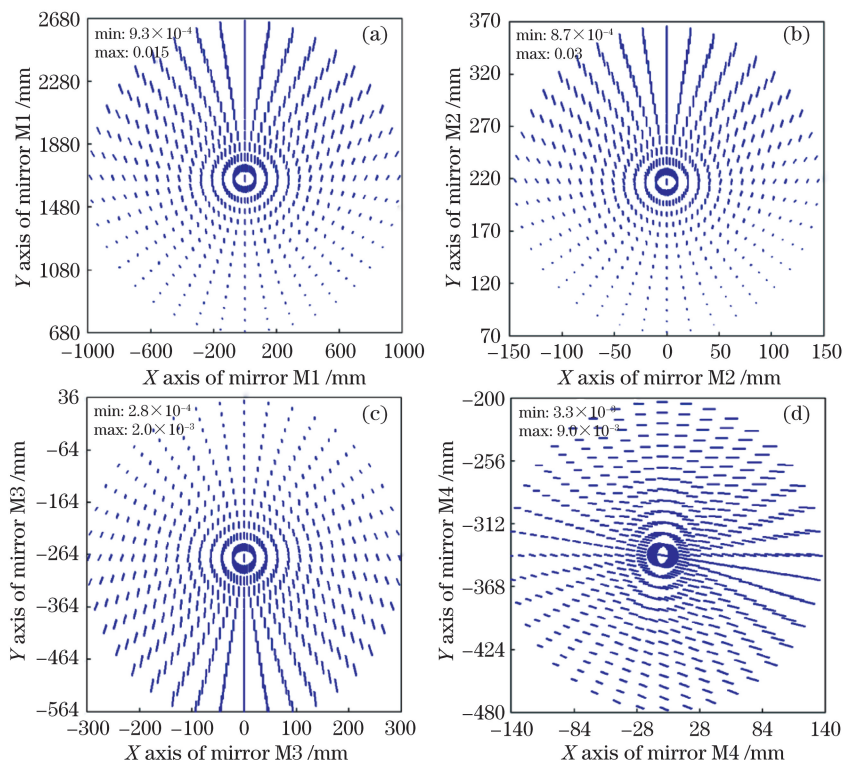


图3 离轴天文望远镜中各个反射镜的相位延迟图。(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

Fig. 3 Retardance maps for each mirror element in the designed unobscured off-axis telescope.

(a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M4

2.2 琼斯矩阵

琼斯矩阵可以表示除退偏外的所有偏振特性,偏振像差函数就是琼斯矩阵随物面坐标和瞳面坐标变化的函数^[2]。光线经过光学系统后,其偏振态会受到光学系统的影响,光学系统针对每一条光线均

存在一个琼斯矩阵。不同光线经过光学系统的路径不同,使得光学系统对每条光线的琼斯矩阵也不同。为表征整个光学系统的偏振特性,通过偏振光线追迹,可以得到任意一个物点发出的所有光线经过光学系统后在出瞳面的琼斯矩阵集合,有

$$\mathbf{J}(x, y) = \begin{bmatrix} J_{XX}(x, y) & J_{XY}(x, y) \\ J_{YX}(x, y) & J_{YY}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{XX}(x, y) \exp[i\varphi_{XX}(x, y)] & A_{XY}(x, y) \exp[i\varphi_{XY}(x, y)] \\ A_{YX}(x, y) \exp[i\varphi_{YX}(x, y)] & A_{YY}(x, y) \exp[i\varphi_{YY}(x, y)] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： (x, y) 表示物点发出光线与出瞳面的交点坐标； $A_{XX}(x, y)$ 表示与出瞳面相交于点 (x, y) 的光线在出瞳面的 X 偏振分量相对于该光线在入瞳面时 X 偏振分量的振幅变化； $\varphi_{XX}(x, y)$ 表示出射的 X 偏振分量相对于入射的 X 偏振分量的相位变化； $A_{YX}(x, y)$ 则表示入瞳面光线 X 偏振分量经过光学系统后，从出瞳面点 (x, y) 出射时转变为 Y 偏振分量的振幅； $\varphi_{YX}(x, y)$ 表示出射的 Y 偏振分量相对于入射的 X 偏振分量的相位变化。(4)式所示的琼斯矩阵集合就是琼斯瞳，它用来表征物点发出光线从入瞳面到出瞳面之间的偏振态变化^[26]。

针对图1所示离轴望远镜系统，通过偏振光线追迹，计算得到其零视场光线的琼斯瞳如图4所示，

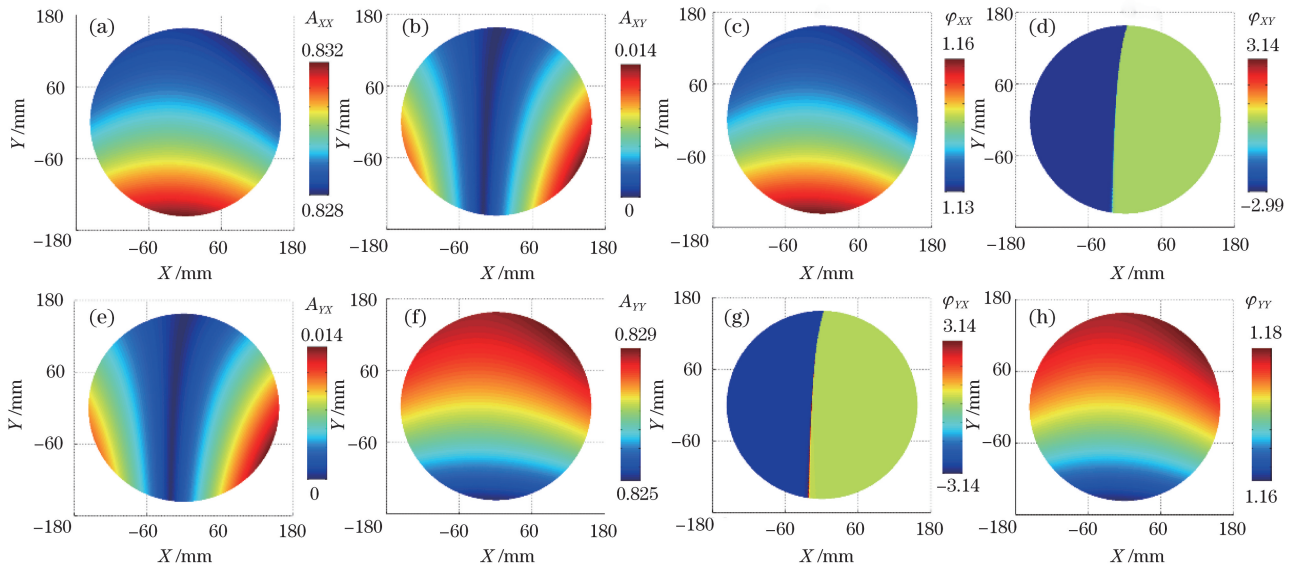


图4 琼斯瞳图。(a) A_{XX} ；(b) A_{XY} ；(c) φ_{XX} ；(d) φ_{XY} ；(e) A_{YX} ；(f) A_{YY} ；(g) φ_{YX} ；(h) φ_{YY}

Fig. 4 Jones pupils. (a) A_{XX} ；(b) A_{XY} ；(c) φ_{XX} ；(d) φ_{XY} ；(e) A_{YX} ；(f) A_{YY} ；(g) φ_{YX} ；(h) φ_{YY}

从图4可以看出， A_{XX} 幅值总体上要略大于 A_{YY} ，这表明该离轴望远镜对 X 偏振光的透过率要大于 Y 偏振光，这将对非偏振光源成像造成影响。非对角线 A_{XY} 和 A_{YX} 表征偏振串扰，显然偏振串扰的振幅远小于对角线 $A_{XX}(x, y)$ 和 $A_{YY}(x, y)$ 。需要特别指出的是，同轴系统中经常出现的黑十字花样(Maltese cross)琼斯瞳图样^[25]在图4所示的离轴系统中没有出现。

2.3 振幅响应矩阵

像面的复振幅分布与出瞳面的复振幅分布满足傅里叶变换关系。将(4)式的琼斯瞳进行空间傅里叶变换^[27]，有

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} F[J_{XX}(x, y)] & F[J_{XY}(x, y)] \\ F[J_{YX}(x, y)] & F[J_{YY}(x, y)] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中各个子图的横坐标表示出瞳面的 X 轴，纵坐标是 Y 轴，单位均为 mm 。可以看出，每个子图的分布比较均匀（注意各个子图的数值刻度不同）， $A_{XX}(x, y)$ 与 $A_{YY}(x, y)$ 的幅值接近于0.83，而 $A_{XY}(x, y)$ 与 $A_{YX}(x, y)$ 的元素接近于0。总体而言，图4所示琼斯瞳的所有琼斯矩阵都近似于单位矩阵。 $A_{XX}(x, y)$ 的最大值约为0.83，这意味着光线在望远镜系统中经过多次反射后存在光能损失。图4中各个子图出现小范围的波动，这表明计算的离轴天文望远镜系统存在一定的偏振像差。需要指出的是，相位延迟 φ_{XY} 与 φ_{YX} 变化剧烈且不连续，原因在于当反射系数等于0时，其相位变化 π ^[2]。因此，图4中 φ_{XY} 和 φ_{YX} 的突变边界线与 A_{XY} 和 A_{YX} 等于0的边界线是一致的。

式中： \mathbf{M} 表示系统的振幅响应矩阵，这是振幅响应函数的琼斯扩展矩阵^[27]。将图4所示琼斯瞳代入(5)式进行傅里叶变换，得到图1所示离轴望远镜系统的振幅响应矩阵，其幅值如图5所示。图5中结果均以 M_{XX} 的最大值进行了归一化处理。

由图5可以发现，对角线 M_{XX} 与 M_{YY} 非常接近于衍射受限系统的振幅响应函数。非对角线 M_{XY} 与 M_{YX} 表示偏振串扰，也称为衍生PSF(ghost PSF)。 M_{XY} 的最大幅值约为 M_{XX} 最大幅值的0.0043倍，因此偏振串扰会将该离轴望远镜系统的成像对比度限制在 10^{-5} 量级，这将对星冕仪等后端设备造成显著影响。相比较于同轴望远镜系统^[2]，图5中各个偏振分量的振幅响应函数均更加锐利，这也是无遮拦离轴望远镜系统的重要优势。

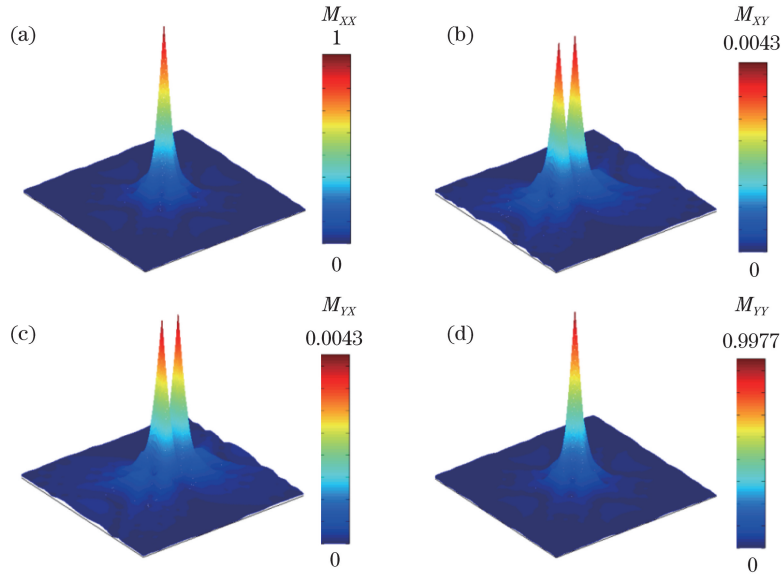


图 5 振幅响应矩阵的幅值。(a) M_{XX} ; (b) M_{XY} ; (c) M_{YX} ; (d) M_{YY}

Fig. 5 Amplitude of the ARM. (a) M_{XX} ; (b) M_{XY} ; (c) M_{YX} ; (d) M_{YY}

正如前面提到的,绝大多数天文目标均为非偏振光源,而非偏振光总是可以分解为两组不相干的正交偏振光。因此,非偏振光线经过该离轴望远镜成像时会形成 4 种不同的波前,进而生成由图 5 所示的 4 种振幅响应函数非相干叠加(强度叠加)得到的像面分布^[2]。偏振像差使得图 5 中偏振串扰项 M_{XY} 与 M_{YX} 出现两个峰值,这将导致图 1 所示望远镜系统的像面光强分布失去旋转对称性,进而改变望远镜 PSF 空间分布。因此,有必要研究偏振像差对离轴望远镜系统光学椭率的影响。

3 望远镜偏振像差对其光学椭率的影响

精确建模并定标测量天文望远镜系统自身的 PSF 椭率是探测宇宙弱引力透镜效应的关键。引力透镜效应是指背景源发出的光或辐射经过天体引力场,比如恒星、星系或暗物质晕等大尺度结构高密度区附近时,光线会像通过光学透镜一样发生偏折^[17]。目前,主要通过统计星系像点的形状分布来测量弱引力透镜信号^[28]。理论上,当没有弱引力透镜效应时,星系的形状分布是随机的,其椭率值为 0。若光径上存在弱引力透镜效应,视场内大量星系经望远镜所成像的形状分布不再均匀,其椭率值将大于 0。然而,弱引力透镜效应对星系像点形状造成的改变约为 1%,往往小于天文望远镜自身非理想光学特性造成的椭率变化^[15]。因此,为精确测量因弱引力透镜效应引起的星系像点椭

率变化,必须首先排除光学系统自身椭率的影响,故需要对光学系统的 PSF 进行精确建模和定标测量。根据 Euclid 空间望远镜的分析结果^[20],要求望远镜系统在全视场范围内光学椭率的插值误差均小于 2×10^{-4} 。

椭率表征了望远镜系统 PSF 的空间分布特性。 $I(x, y)$ 表示像面点 (x, y) 的光强,像面 PSF 的质心为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint I(x, y)W(x, y)x dx dy}{\iint I(x, y)W(x, y) dx dy} \\ \bar{y} = \frac{\iint I(x, y)W(x, y)y dx dy}{\iint I(x, y)W(x, y) dx dy} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $W(x, y)$ 是权重函数。通过(6)式可以确定像面的中心,由此可以得到 PSF 的二阶矩

$$\begin{cases} Q_{XX} = \frac{\iint I(x, y)W(x, y)(x - \bar{x})^2 dx dy}{\iint I(x, y)W(x, y) dx dy} \\ Q_{XY} = \frac{\iint I(x, y)W(x, y)(x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy}{\iint I(x, y)W(x, y) dx dy} \\ Q_{YY} = \frac{\iint I(x, y)W(x, y)(y - \bar{y})^2 dx dy}{\iint I(x, y)W(x, y) dx dy} \end{cases}, \quad (7)$$

进而可得 PSF 椭率^[17]为

$$e = \frac{Q_{XX} - Q_{YY} + 2iQ_{XY}}{Q_{XX} + Q_{YY}} \quad (8)$$

针对图 1 所示离轴望远镜系统各反射镜镀膜理想膜以及镀金属铝膜的两种情况,计算并对比该望远镜各个视场的光学椭率变化,结果如图 6 和图 7 所示。当反射镜均镀膜理想膜时,系统不存在偏振像差,只有波像差。

图 6(a)给出了离轴望远镜在两种镀膜情况下

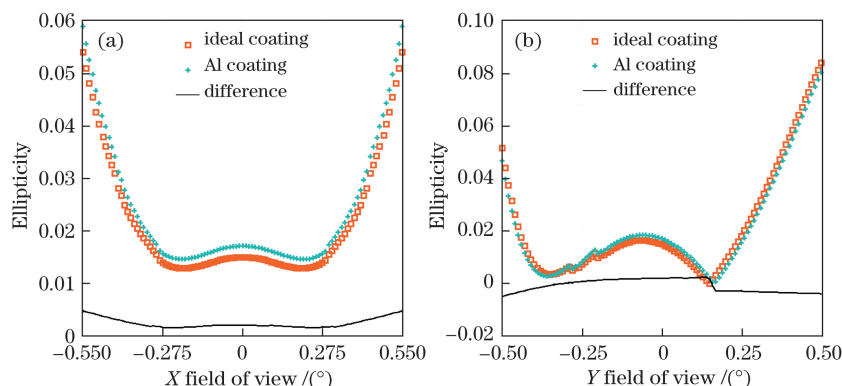


图 6 因偏振像差导致的离轴望远镜椭率随 X 视场和 Y 视场的变化曲线。(a) X 视场; (b) Y 视场

Fig. 6 Optics ellipticity induced by polarization aberrations of the off-axis telescope varies along with the X and Y field of view. (a) X field of view; (b) Y field of view

探测弱引力透镜效应时,研究望远镜全视场的椭率变化特性非常重要^[17]。图 7(a)和图 7(b)分别给出了图 1 所示离轴望远镜系统镀膜理想膜和镀金属铝膜时在 $1.1^\circ \times 1^\circ$ 全视场范围内的光学椭率分布,图 7(c)表示该望远镜在两种不同镀膜条件下的椭率差值的全视场分布。可以发现,偏振

自身光学椭率随 X 方向视场的变化曲线,而 Y 方向视场始终为 0。图 6(b)则将 X 方向视场设定为 0,计算了光学椭率随 Y 方向视场的变化。可以发现,相比较于理想镀膜,望远镜镀金属铝膜后各个视场的椭率均出现不同程度的变化。图 6(a)和 6(b)中的实线表示望远镜系统两种镀膜条件下的椭率差值,也表示因镀膜而产生的偏振像差造成 PSF 椭率的变化量。容易看出,因偏振像差导致的椭率变化随视场的不同而不同。

像差不仅会改变系统椭率,而且会改变椭率随视场的变化。由图 7(c)可知,全视场范围内因偏振像差导致的椭率最大改变量为 7.5×10^{-3} ,平均改变量为 2.7×10^{-3} 。显然,偏振像差会对图 1 所示的离轴天文望远镜的光学椭率造成重要影响。

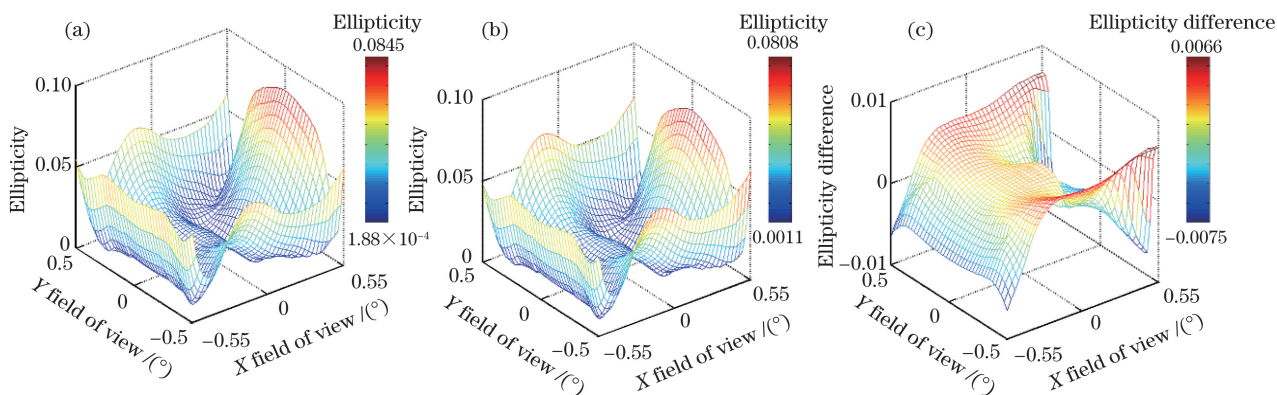


图 7 不同镀膜条件下离轴望远镜的椭率以及椭率差值在全视场的分布。(a)镀膜理想膜;(b)镀铝膜;(c)镀两种膜后椭率的差值

Fig. 7 Optics ellipticity maps of the off-axis telescopes with ideal coating and Al coating, and difference of optics ellipticity of the off-axis telescopes at ideal coating and Al coating. (a) Ideal coating; (b) Al coating; (c) difference of optics ellipticity at ideal coating and Al coating

根据弱引力透镜效应和光学椭率探测原理^[15,20],需要由视场范围内特征点源(一般选择高

质量恒星)的已知椭率,通过插值得到范围内任意视场位置的望远镜椭率,从而剔除望远镜自身对目标

星系待测椭率的影响。显然,椭率插值误差会直接决定弱引力透镜效应的探测精度。根据 Euclid 空间望远镜要求^[20],全视场范围内椭率插值误差不能超过 2×10^{-4} 。对于本课题组在研的天文望远镜,其单个探测器焦面尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,采样间隔为 10 mm ,每次可以得到 6×6 个采样点的椭率值^[15],如图 8 所示。由这 36 个视场网格点,通过插值可得到 25 个中心视场位置的椭率值,如图 8 中圆点所示。将圆点视场位置望远镜系统的真实椭率与由周边 36 个点插值得到的椭率值进行比较,即可得到插值误差。

根据图 8 所示原理,在视场点 $[-0.0487^\circ, 0.155^\circ]$ 附近,以焦面 5 mm 为间隔,计算 11×11 个视场网格点的椭率值,结果如图 9 所示。当为在研天文望远镜理镀膜时,中心 25 个视场点真实椭率与由三次插值算法得到的椭率的最大插值误差为 1.2×10^{-4} ,满足 Euclid 空间望远镜的要求。然而,保

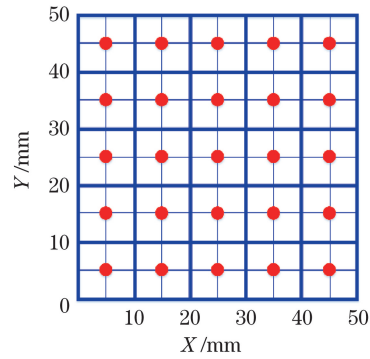


图 8 椭率插值计算原理示意图
Fig. 8 Schematic diagram of interpolation calculation principle for ellipticity

持其他所有参数不变,只将望远镜的镀膜变为金属铝膜后,同样将视场位置的椭率插值最大误差变为 1.1×10^{-3} ,超出了 Euclid 空间望远镜要求的 2×10^{-4} 。该结果充分表明,镀金属铝膜后产生的偏振像差将对该在研天文望远镜造成显著影响。

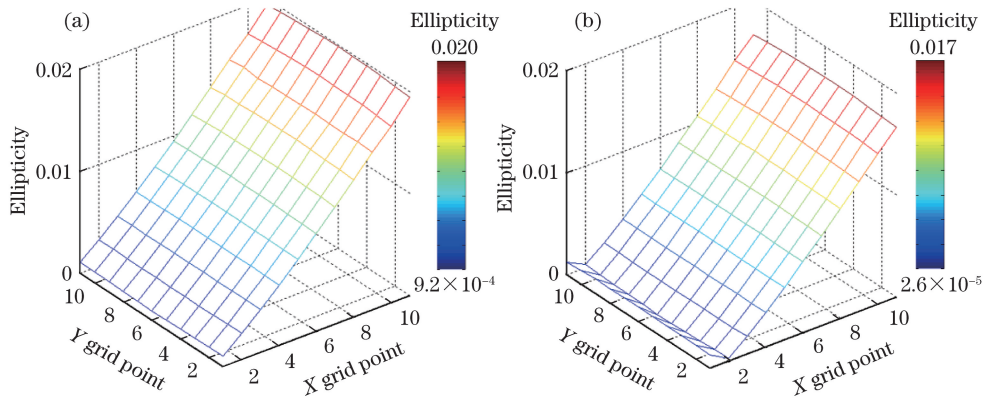


图 9 理想镀膜和镀金属铝膜条件下离轴天文望远镜的椭率分布。(a)理想镀膜;(b)镀金属铝膜
Fig. 9 Optics ellipticity distribution of the off-axis telescope with ideal coating and Al coating.

(a) Ideal coating; (b) Al coating

4 结 论

通过偏振光线追迹,分析了一种将用于探测宇宙弱引力透镜效应的无遮拦离轴天文望远镜的偏振像差。计算了该望远镜中各个反射镜的二向衰减分布以及相位延迟分布,得到了望远镜系统的琼斯瞳和振幅响应矩阵。结果表明,该离轴望远镜的偏振像差分布与同轴望远镜存在显著差别。偏振像差会将部分光强耦合到正交偏振态,形成衍生 PSF,进而将该望远镜的成像对比度限制在 10^{-5} 量级。此外,计算发现偏振像差还会改变望远镜 PSF 的空间分布。在此基础上,计算了偏振像差对离轴望远镜 PSF 椭率的影响。结果表明,偏振像差会导致该望远镜的光学椭率在全视场范围内发生不同程度的变

化,最大变化量为 7.5×10^{-3} ,平均变化量为 2.7×10^{-3} 。在视场 $[-0.0487^\circ, 0.155^\circ]$ 附近,偏振像差使得该望远镜光学椭率最大插值误差由 1.2×10^{-4} 增大为 1.1×10^{-3} ,进而超出了 Euclid 空间望远镜要求的 2×10^{-4} 。本文研究结果表明,在研制探测弱引力透镜效应等要求超高成像质量的天文望远镜时,望远镜系统的偏振像差是一项不可忽略的误差源。因此,除了计算望远镜系统的光程差,以得到最好的波像差表现外,还需针对偏振像差进行优化设计。

优化偏振像差的方法,主要有减少反射镜、避免大角度反射、优化镀膜等。然而,上述措施往往与望远镜系统的其他关键指标相冲突,比如工程要求、波像差要求、光学效率要求等。因此,需针对特定的天

文望远镜, 兼顾多个光学指标和系统参数, 在总体层面对偏振像差进行优化, 这将是我们的下一阶段的主要工作。此外, 为方便计算, 本文假定设计的离轴天文望远镜的镀膜均为金属铝膜。在今后的工作中, 应该根据该望远镜的真实镀膜特点, 对其偏振像差再次进行分析。

参 考 文 献

- [1] Chipman R A. Polarization aberrations[D]. Tucson: University of Arizona, 1987.
- [2] Breckinridge J B, Lam W S T, Chipman R A. Polarization aberrations in astronomical telescopes: the point spread function [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127(951): 445-468.
- [3] Meng Z J, Li S K, Wang X Z, et al. Polarization aberration measurement method based on principal component analysis of differential aerial images [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712006.
孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分空间像主成分分析的偏振像差检测方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712006.
- [4] Li C Y, Lu W G, Qiao L. Analysis and research of polarization aberration in rapid space angle measuring system [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67 (3): 0307037.
李春艳, 陆卫国, 乔琳. 快速空间测角系统中偏振像差的分析与研究 [J]. 物理学报, 2018, 67 (3): 0307037.
- [5] Yang Y F, Yan C X, Hu C H, et al. Polarization aberration analysis of coherent laser communication system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36 (11): 1106003.
杨宇飞, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 相干激光通信光学系统偏振像差研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106003.
- [6] Qiu B W. Analysis and simulation for polarization aberration of spatial optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
邱宝玮. 空间光学系统中偏振像差的分析 and 模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] Wang J Y, Li Y C, Shi H D, et al. Study on polarization characteristics of full-field and full-pupil in refractive and reflection telephoto system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48 (3): 0318004.
王稼禹, 李英超, 史浩东, 等. 折反式望远系统全视场全口径偏振特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0318004.
- [8] Wang G C, Wang J L, Zhang Z D, et al. Polarization analysis of the telescope system used for space target polarization detection [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211003.
王国聪, 王建立, 张振铎, 等. 用于空间目标偏振探测的望远镜系统偏振分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211003.
- [9] Luo J, Liu D, Huang Z H, et al. Polarization properties of receiving telescopes in atmospheric remote sensing polarization lidars [J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6837-6845.
- [10] Luo J. Research on key technologies and system of high-precision polarization lidar [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
罗敬. 高精度偏振激光雷达关键技术及系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [11] de Juan Ovelar M, Snik F, Keller C U, et al. Instrumental polarisation at the Nasmyth focus of the E-ELT [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 562: A8.
- [12] Anche R M, Anupama G, Sriram S, et al. Estimation of polarization aberrations and its effect on the point spread function of the Thirty Meter Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10703: 107034K.
- [13] de Juan Ovelar M, Snik F, Keller C U. M&M's: an error budget and performance simulator code for polarimetric systems [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8160: 81600C.
- [14] Atwood J, Skidmore W, Anupama G C, et al. Polarimetric analysis of the thirty meter telescope (TMT) for modeling instrumental polarization characteristics [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9150: 915013.
- [15] Zeng F, Zhang X, Zhang J P, et al. Optics ellipticity performance of an unobscured off-axis space telescope [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25277-25285.
- [16] Kuhn J R, Hawley S L. Some astronomical performance advantages of off-axis telescopes [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1999, 111(759): 601-620.
- [17] Bartelmann M, Schneider P. Weak gravitational lensing [J]. Physics Reports, 2001, 340(4/5): 291-472.
- [18] Kaiser N, Squires G, Broadhurst T. A method for weak lensing observations [J]. The Astrophysical Journal Letters, 1995, 449: 460-475.
- [19] Erben T, van Waerbeke L, Bertin E, et al. How accurately can we measure weak gravitational shear? [J]. Astronomy & Astrophysics, 2001, 366 (3): 717-735.
- [20] Laureijs R, Amiaux J, Arduini S, et al. Euclid

- definition study report [EB/OL]. (2011-10-14) [2019-10-02]. <https://arxiv.org/abs/1110.3193>.
- [21] Debes J H, Ygouf M, Choquet E, et al. WFIRST-AFTA coronagraphic operations: lessons learned from the hubble space telescope and the james webb space telescope [EB/OL]. (2015-11-19) [2019-10-02]. <https://arxiv.org/abs/1511.06277>.
- [22] Jarvis M K, Schechter P, Jain B. Telescope optics and weak lensing: PSF patterns due to low order aberrations [EB/OL]. (2008-10-01) [2019-10-02]. <https://arxiv.org/abs/0810.0027>.
- [23] McPeak K M, Jayanti S V, Kress S J P, et al. Plasmonic films can easily be better: rules and recipes [J]. ACS Photonics, 2015, 2(3): 326-333.
- [24] Goldstein D. Polarized light [M]. New York: CRC Press, 2003.
- [25] Chipman R A, Young G, Lam W S T. Polarized light and optical systems [M]. New York: CRC Press, 2018.
- [26] Ruoff J, Totzeck M. Orientation Zernike polynomials: a useful way to describe the polarization effects of optical imaging systems [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 2009, 8(3): 031404.
- [27] McGuire J P, Chipman R A. Diffraction image formation in optical systems with polarization aberrations I: formulation and example [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(9): 1614-1626.
- [28] Mandelbaum R, Rowe B, Bosch J, et al. The third gravitational lensing accuracy testing (great3) challenge handbook [J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 2014, 212(5): 1-28.