



·激光大气传输技术·

高精度等晕角测量关键技术研究*

强希文, 吴敏, 宗飞, 翟胜伟, 胡月宏, 封双连, 赵军卫, 常金勇

(中国电子科技集团公司第 27 研究所, 郑州 450047)

摘 要: 等晕角是重要大气光学参数之一, 对天文光学站址选择、大气湍流效应自适应光学校正效果评价等有着重要的意义。分析了国内外等晕角测量技术, 介绍了等晕角测量的基本原理, 设计了三环变迹镜并开展了数值验证, 分析并提出了高精度等晕角测量仪的主要技术指标, 研制了一套高精度等晕角测量仪, 结果表明, 该仪器能够满足全天时的等晕角测量。

关键词: 等晕角; 测量技术; 三环变迹镜; 大气光学; 自适应光学

中图分类号: P412

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210215

High-precision measurement technique of isoplanatic angle

Qiang Xiwen, Wu Min, Zong Fei, Zhai Shengwei, Hu Yuehong, Feng Shuanglian, Zhao Junwei, Chang Jinyong

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: Isoplanatic angle is an important parameter in atmospheric optics field, and it is important for astronomical site optics selection, and evaluation of adaptive compensation for effects of atmospheric turbulence. Past measurement techniques of isoplanatic angle in the world is analyzed, and fundamental measurement principle of isoplanatic angle is introduced. A three annuli mirror was designed and its usability and precision has been verified. Primary specifications was put forward and a prototype has been developed for high precision measurement of isoplanatic angles. The results show that the prototype can measure isoplanatic angle day and night.

Key words: isoplanatic angle; measurement technique; tri-annuli apodizing mask; atmospheric optics; adaptive optics

等晕角是描述光波在湍流大气中传输时相位一致的最大角度, 角度再增大时光波便无同相位性, 在等晕角范围内大气路径上湍流造成的波前畸变基本一致。利用自适应光学系统对经湍流大气传输的光波进行校正时, 要求信标光与光波传输方向夹角尽可能小, 一般不大于等晕角。若信标光与光波传输方向的夹角大于等晕角, 由于信标光所携带的大气湍流信息不能正确反映与需要校正的光路上的大气湍流信息, 则利用自适应光学系统对外大气光路的湍流效应进行校正时, 达不到需要校正的效果, 甚至会出现校正后效果更差的情况。

自 20 世纪 60 年代末 D. L. Fried 提出等晕角^[1]并被国内外学者普遍认同以来, 等晕角的测量技术受到了广泛关注。从等晕角的定义式(2)可以看出, 等晕角是大气折射率结构常数沿路径的加权积分, 权函数为路径的“5/3”次幂。如果已知大气折射率结构常数的廓线分布, 则可利用大气折射率结构常数沿路径的加权积分计算给出等晕角。但是, 由于在实际条件下很难做到对于大气折射率结构常数廓线的实时测量, 所以, 很难利用公式(1)来进行等晕角的准确测量。

当不能够利用大气折射率结构常数沿路径的加权积分给出等晕角时, 就转而寻找另外的方法进行等晕角的测量。如果存在一种器件, 能够实现对路径的“5/3”次幂的调制, 那么, 就可实现对等晕角的测量。因此, 自然而然就想到了利用某种器件对所接收的光波进行调制, 达到模拟路径“5/3”次幂这样的加权函数。这样的器件就是所谓的“变迹镜”。G. C. Loos 和 C. B. Hogge 在 1979 年首次提出变迹镜的概念^[2]后, 1983 年 D. L. Walters 将其完善并应用^[3], 使用单孔型变迹镜实现了对光波的调制, 结合卡赛格林结构的天文望远镜研制成功了第一代等晕角测量仪, 但是由于变迹镜所模拟的“5/3”次幂加权函数与实际要求具有较大的差距, 所以, 等晕角测量精度较低。

为了提高测量精度, 1985 年 Kurt B. Stevens 重新设计了变迹镜, 首次使用双环型变迹镜^[4], 改进了高度位于 10 km

* 收稿日期: 2021-06-01; 修订日期: 2021-08-02

作者简介: 强希文(1967—), 男, 研究员, 主要从事大气光学与自适应光学、激光与物质相互作用等方面研究。

之下的部分大气湍流对测量的影响,在一定程度上提高了等晕角测量仪的测量精度,并在美国白沙靶场和卡皮斯特丹诺靶场得到了应用;1986年3月,美国 Hanscom 空军基地在宾夕法尼亚州立大学进行的等晕角测量也使用了该型测量仪^[5],测量结果表明当地的日平均大气等晕角的值约为 6.67 μrad 。

由于等晕角是距离的“5/3”次幂加权积分,所以高空大气湍流对等晕角的贡献较大,双环型变迹镜虽然能够较好地反映高空大气湍流的影响,但是不能够很好地反映低空大气湍流的影响,所以,其测量的精度仍有待提高。截止 1997 年,基于天文选址以及军事需要,世界上已有多达 20 个站址开展了为期约 20 年的等晕角测量,D. L. Walters 等人^[6]对其中 18 个站址的 20 年测量结果进行了分析和总结。

国内开展等晕角测量技术研究工作的单位主要包括中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国人民解放军 63655 部队等单位,其中中国科学院安徽光学精密机械研究所使用基于单孔型变迹镜的等晕角测量技术^[7],中国人民解放军 63655 部队开展了双环和三环结构变迹镜等晕角测量技术研究^[8-9]。

1 等晕角测量关键技术

由于实际的自适应光学系统对外光路大气湍流所引起的波面畸变不可能完全校正,总会由于各种原因带来校正残差,为了达到预定的校正效果,必须将自适应光学系统的校正残差控制在一定的范围之内,并对自适应光学系统的校正残差进行分配。自适应光学系统变形镜的波前校正残差中很主要的一个因素就是角度非等晕残差^[10]

$$\sigma_{\text{angle}}^2 = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{5/3} \quad (1)$$

式中: θ 为信标光路与发射光束之间的夹角, θ_0 为大气湍流等晕角^[11],可表示为

$$\theta_0 = \left[2.91k^2 \sec^{8/3} \varphi \int_0^L C_n^2(z) z^{5/3} dz\right]^{-3/5} \quad (2)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为光波波数, λ 为光波波长; $C_n^2(z)$ 为沿路径 z 的大气折射率结构常数廓线分布; φ 为天顶角。

1.1 等晕角测量原理

星光经湍流大气传输后会出现光波强度的起伏,将接收望远镜的入瞳设计为圆对称的孔径,其透过率为 $P(\rho)$, $0 \leq P(\rho) \leq 1$,其中 ρ 为距离入瞳中心的距离,设经过望远镜所接收到的星光的强度为 S ,则望远镜所接收到星光强度起伏的归一化方差为

$$\sigma_s^2(\varphi) = 4(2\pi)^4 0.033 \sec^{8/3} \varphi k^2 A^{-2} \int_0^\infty C_n^2(z) W(z) dz \quad (3)$$

其中 $A = 2\pi \int \rho P(\rho) d\rho$ 。比较公式(2)和公式(3)可以看出,若能够使得公式(3)中的加权函数 $W(z)$ 的形式为

$$W(z) = cz^{5/3} \quad (4)$$

则可以利用星光强度的起伏方差反演计算等晕角。将式(4)代入式(3)后,利用式(2)和式(3)可得

$$\theta_0(\varphi) = 12.9A^{-6/5} c^{3/5} [\sigma_s^2(\varphi)]^{-3/5} \quad (5)$$

即可以通过测量归一化星光强度起伏方差 $\sigma_s^2(\varphi)$ 计算给出等晕角 $\theta_0(\varphi)$ 。

1.2 三环变迹镜的设计与数值验证

通过以上的分析可以看出,设计出一种对所接收的星光强度进行调制的变迹镜,使其加权函数如式(4),是等晕角高精度测量的关键技术之一。对于透过率为 $P(\rho)$ 的接收孔径,其加权函数 $W(z)$ 的表示形式为

$$W(z) = \int_0^\infty \left| \int d\rho J_0(L\rho) P(L\rho) \right|^2 L^{-8/3} \sin^2 \left[\frac{L^2 z}{2k} \right] dL \quad (6)$$

这里 $J_0(x)$ 为零阶 Bessel 函数,其中 n 阶 Bessel 函数的形式为^[5]

$$J_n(x) = (x/2)^n \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k} \quad (7)$$

考虑到单孔径变迹镜和双环变迹镜的不足,且为了实际工程中便于实现,变迹镜设计时所应用的透过率函数 $P(L\rho)$ 形式为

$$P(L\rho) = \begin{cases} 1, & R_1 \leq \rho \leq R_2, R_3 \leq \rho \leq R_4, R_5 \leq \rho \leq R_6 \\ 0, & 0 \leq \rho \leq R_1, R_2 \leq \rho \leq R_3, R_4 \leq \rho \leq R_5 \end{cases} \quad (8)$$

通过大量的计算，给出如表 1 所示的三环型变迹镜设计参数，所设计的变迹镜如图 1 所示，其中 $W(z)$ 的计算值及其拟合曲线 $W(z)=8.847\times 10^{-17}z^{5/3}$ 如图 2 所示。由图 2 可以看出，所设计的变迹镜能够很好地拟合并模拟距离“5/3”次幂的加权函数。

为了对所设计的变迹镜进行数值验证，对所设计的三环变迹镜与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性进行了分析，同时，与单孔径变迹镜和双环变迹镜进行了比对。表 2 为单孔径变迹镜和双环变迹镜的设计参数，计算时所用参数为：光波波长 $\lambda=0.5\ \mu\text{m}$ ，天顶角为 0° ，内尺度 $l_0=0.005\ \text{m}$ ，外尺度 $L_0=10\ \text{m}$ ，积分步长为 $15\ \text{m}$ 。

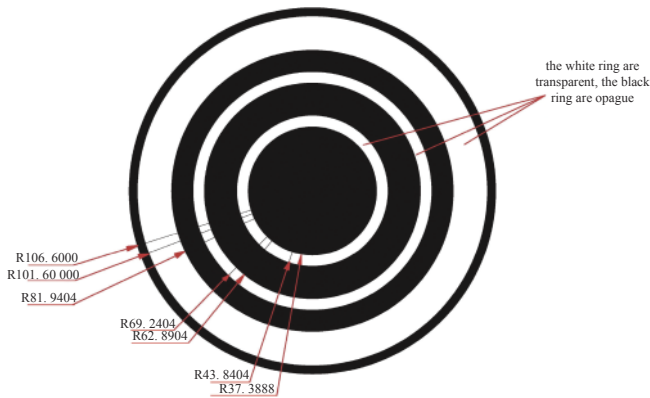


Fig. 1 Diagrammatic layout of tri-annuli apodizing mask (unit: mm)

图 1 三环变迹镜示意图

表 1 变迹镜结构尺寸
Table 1 Size of tri-annuli apodizing mask

type of apodizing mask	radius /mm
center block	35.560
telescope	101.60
inside/outside radius of inner transmittance ring	37.3888/43.8404
inside/outside radius of middle transmittance ring	62.8904/69.2404
inside/outside radius of outer transmittance ring	81.9404/101.6000

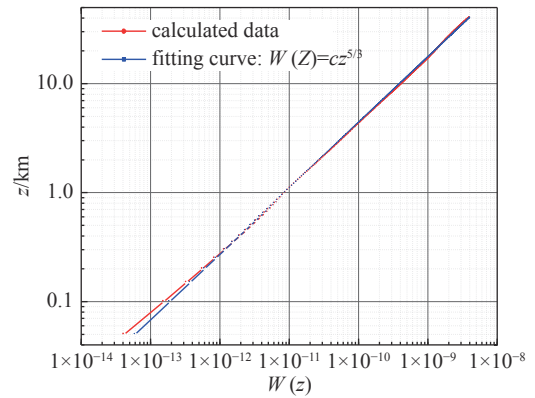


Fig. 2 Calculated value of $W(z)$ compared with its fitting curve

图 2 $W(z)$ 的计算值及其拟合曲线比较

表 2 变迹镜结构尺寸

Table 2 The size of apodizing mask

design procedures of apodizing mask	fit coefficient c of weighting function	transmittance area A of the ring / m^2	inside/outside radius of middle transmittance ring/mm	
single aperture	1.209×10^{-16}	0.0095	radius 55.00	
dual ring	1.551×10^{-16}	0.0205	inside/outside radius of inner transmittance ring	37.50/50.00
			inside/outside radius of outer transmittance ring	70.00/101.6

图 3 给出了三种变迹镜与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性及其误差。可以看出，三环变迹镜和双环变迹镜与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性优于单孔径变迹镜；双环变迹镜在高度 $1\sim 30\ \text{km}$ 范围与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性很好，但高度小于 $1\ \text{km}$ 时，与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性较差；而三环变迹镜能够在整个高度范围与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性均很好。

为进一步验证变迹镜设计的合理性，利用常用的大气折射率结构常数廓线 H-V 模型，计算了三种变迹镜测量的相对误差如图 4 所示。其中 H-V 模型为

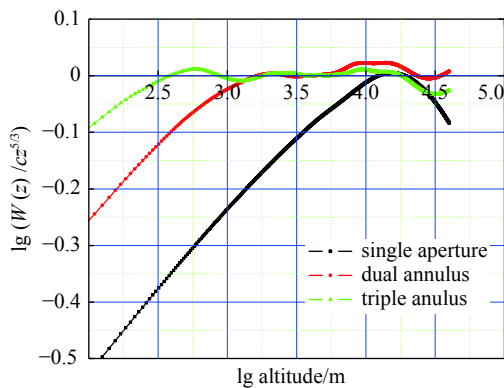


Fig. 3 Weighting function of three kinds of apodizing masks compared with $W(z)=cz^{5/3}$

图 3 三种变迹镜加权函数与 $W(z)=cz^{5/3}$ 的一致性对比

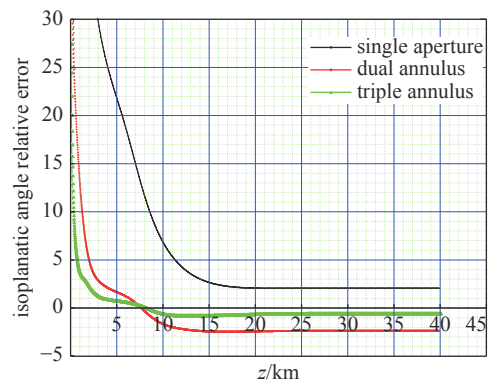


Fig. 4 Comparison of relative error of three kinds of apodizing masks

图 4 三种变迹镜的等晕角相对误差对比

$$C_n^2(z) = 8.16 \times 10^{-54} z^{10} \exp\left(\frac{-z}{1000}\right) + 3.02 \times 10^{-17} \exp\left(\frac{-z}{1500}\right) + 1.90 \times 10^{-15} \exp\left(\frac{-z}{100}\right) \quad (9)$$

由图4可以看出,三环变迹镜所得等晕角相对误差明显小于双环变迹镜和单孔变迹镜的相对误差,总的测量相对误差大约为1.0%。

1.3 等晕角测量动态范围

开展等晕角测量时,天顶角的测量范围可根据实际应用的要求及经验给出。在实际测量时,一般很少使用位于天顶附近的恒星作为信标光源,所以,天顶角的范围一般不小于5°;另外,在实际测量时,一般需把沿测量路径的等晕角实测值归算至沿天顶方向,而这种归算只有在大气湍流符合分层均匀的情况下成立,所以,要求天顶角一般不大于45°;因而,天顶角测量范围可选取为5°~45°。

等晕角测量动态范围,可以结合实际应用来提出。H-V模型和Greenwood模型分别是代表大气湍流较强和较弱两种典型条件下的状态,在此利用H-V模型和Greenwood模型分别对天顶角5°和45°时的等晕角进行了计算,图5为对应的计算结果。

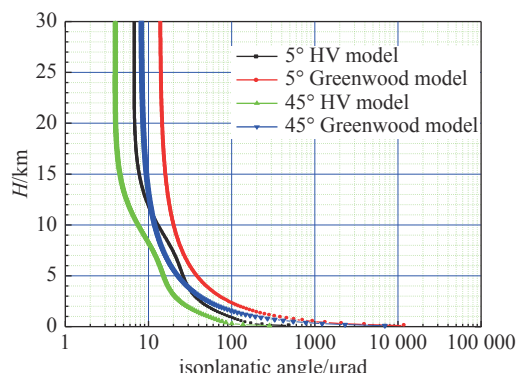


Fig. 5 Isoplanatic angle vary with altitude in different models

图5 不同模型下等晕角随高度变化图

从图5可以看出,对于H-V模型,计算的最大高度为30 km(近似整层高度)时,当天顶角分别为5°和45°时的等晕角值分别为6.9 μrad和3.9 μrad;由于H-V模型对应于强湍流廓线的典型情况,利用该廓线在45°天顶角时计算给出的等晕角即可认为是需要测量的等晕角的最小值。对于Greenwood模型,当天顶角分别为5°和45°时等晕角值分别为14.2 μrad和8.2 μrad;由于Greenwood模型对应于弱湍流廓线的典型情况,利用该廓线在5°天顶角时计算给出的等晕角即可认为是需要测量的等晕角的最大值。所以,在此设计等晕角测量的动态范围为3~20 μrad,可满足正常条件下的测量要求。由于实际测量过程中,一般选取小天顶角情况进行测量,所以,实测值一般不会超出所设计的等晕角测量动态范围。

1.4 高精度等晕角测量仪研制

高精度等晕角测量仪主要由变迹镜、光学接收系统、光学成像系统、数据采集与处理系统、控制系统等组成,组成及布局见图6。如图所示,经湍流大气传输的光波,经过变迹镜后入射至卡式望远镜,后经光学成像系统成像

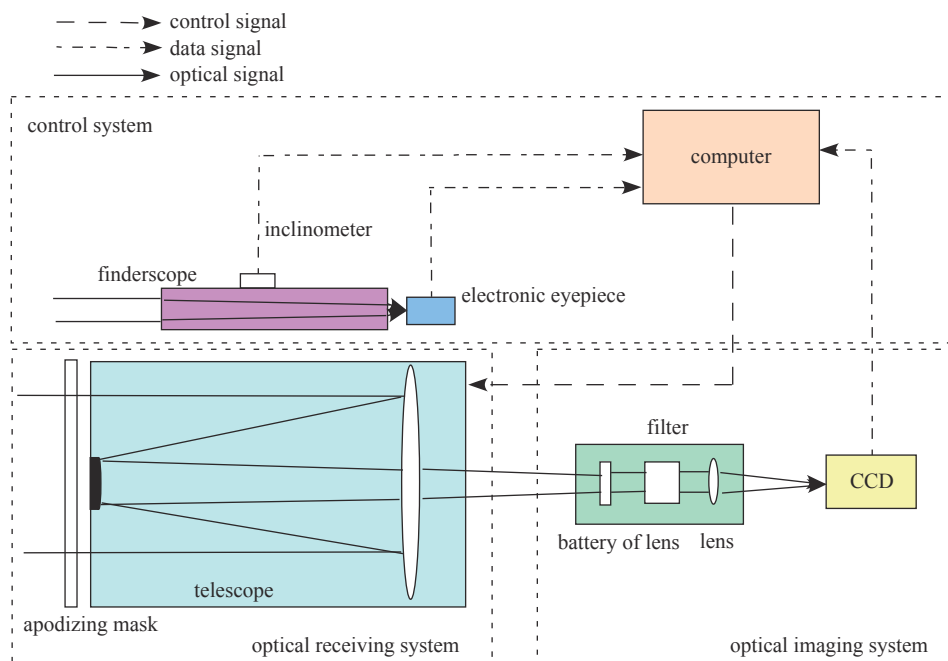


Fig. 6 Composition and layout of high-precision measurement technique of isoplanatic angle

图6 高精度等晕角测量仪组成及布局

聚焦于 CCD 相机的焦平面上, 数据处理系统利用 CCD 相机采集得到的数据反演得出等晕角数据, 同时控制系统根据电子目镜得到的信号对望远镜进行闭环控制, 实现系统对恒星的捕获跟踪。

高精度等晕角测量仪的主要技术指标包括等晕角测量动态范围、采样频率、单次样本量、天顶角测量范围、测量的光谱范围等, 如表 3 所示。图 7 为高精度等晕角测量仪一例实测的典型条件下的全天等晕角测量数据。

表 3 高精度等晕角测量仪的主要技术指标

Table 3 Key specifications of the high-precision isoplanometer

key specifications	design value
dynamic range	3~30 μrad ($\lambda=500\text{ nm}$)
wave length	600~1000 nm
sample frequency	$\geq 300\text{ Hz}$
single sample size	≥ 600
sampling precision	12 bit
variation range of zenith angle	$5^\circ\sim 45^\circ$
variation range of azimuth	$0^\circ\sim 360^\circ$

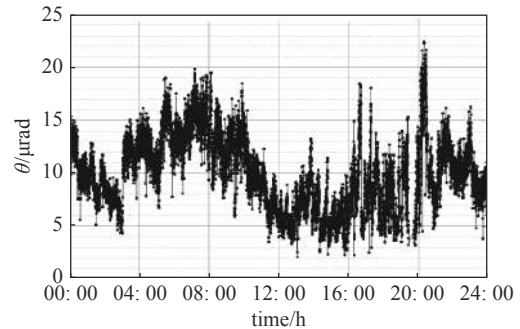


Fig. 7 Measured data through the day in typical conditions

图 7 典型条件下的全天等晕角测量数据

2 结论

对等晕角测量的关键技术进行了分析和讨论, 所设计的三环变迹镜在整层大气湍流范围均可以很好地模拟所需要的加权函数, 分析和确定了包括等晕角测量动态范围、采样频率、单次样本量、天顶角测量范围、测量的光谱范围等在内的等晕角测量系统主要技术指标, 为等晕角测量系统自主研发提供了坚实的技术基础和依据。设计了一套基于光学方法实时测量等晕角的系统, 并给出了系统组成和数据处理算法。

所设计的等晕角测量系统与国内相关单位相比较, 测量精度明显提高。

参考文献:

- [1] Fried D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1380-1384.
- [2] Loos G C, Hogge C B. Turbulence of the upper atmosphere and isoplanatism[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(15): 2654-2661.
- [3] Walters D L. Propagation through atmospheric turbulence[M]//High Energy Laser Propagation Handbook, Chapter 5. Ann Arbor: Optometrics Inc., 1983.
- [4] Stevens K B. Remote measurement of the atmospheric isoplanatic angle and determination of refractive turbulence profiles by direct inversion of the scintillation amplitude covariance function with Tikhonov regularization[D]. Monterey: Monterey Naval Postgraduate School, 1985.
- [5] Eaton F D, Peterson W A, Hines J R, et al. Isoplanatic angle direct measurements and associated atmospheric conditions[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(19): 3264-3273.
- [6] Walters D L, Bradford L W. Measurements of r_0 and θ_0 : two decades and 18 sites[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 7876-7886.
- [7] 杨高潮, 刘晓春, 范承玉, 等. 大气相干长度与等晕角的测量[J]. *强激光与粒子束*, 1994, 6(2): 215-220. (Yang Gaochao, Liu Xiaochun, Fan Chengyu, et al. Measurement of atmospheric coherence length and isoplanatic angle[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(2): 215-220)
- [8] 中国人民解放军63655部队. 一种双环变迹镜及其制备方法和其测量等晕角的方法: 201310277603.1[P]. 2016-03-23. (No. 63655 Troops of the Chinese People S Liberation Army. Dual-ring apodization lens, manufacturing method thereof and method for measuring isoplanatic angle through dual-ring apodization lens: 201310277603.1[P]. 2016-03-23.)
- [9] 中国人民解放军63655部队. 一种基于三环变迹镜的等晕角测量系统及方法: 201310277560.7[P]. 2016-01-06. (No. 63655 Troops of the Chinese People's Liberation Army. Three-ring apodization filter based system and method used for measuring isoplanatic angles: 201310277560.7[P]. 2016-01-06.)
- [10] Tyson R K. Principles of adaptive optics[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [11] Tyson R K. Introduction to adaptive optics[M]. Bellingham: SPIE Press, 2000.