

激光与光电子学进展

500 mm 口径星地激光通信地面接收端系统设计

李聪, 倪小龙, 于信, 刘骏, 白素平, 石利霞*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为提高星地激光通信地面接收端探测灵敏度和分辨能力,减少信标光捕获时间和难度,基于星地激光通信链路和设计方案,结合自适应光学(AO)技术,设计了一套 500 mm 口径的星地激光通信地面接收端系统。该系统采用库德光路、共口径分光探测形式,包含卡塞格林天线、倾斜镜精跟踪、AO超精跟踪、AO波前探测等 4 个单元。天线物镜组采用同轴卡塞格林结构,结合折射镜组构成开普勒望远结构,兼顾体积和长出瞳距的需求。在精跟踪倾斜镜和 AO 倾斜镜之间设计了 4f 系统,解决校正光轴时的瞳面漂移问题。在波前探测器和变形镜之间设计了双远心系统,构建两者共轭关系,降低波前探测的轴向误差影响。采用光学被动式方法对 4 个单元进行消热差设计,提高系统温度适应性。最终实验结果表明:在 10 °C~30 °C 范围内,各单元波像差均优于 $1/10\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm),满足设计要求,具有一定借鉴价值和工程意义。

关键词 星地激光通信; 库德光路; 消热差; 双远心光路; 自适应光学

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240623

Design of Ground Receiver System For 500 mm Aperture Satellite-Ground Laser Communication

Li Cong, Ni Xiaolong, Yu Xin, Liu Jun, Bai Suping, Shi Lixia*

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In order to enhance the sensitivity and resolution of the ground receiver for satellite-based laser communication, as well as simplify the acquisition process for beacon light, a 500 mm aperture ground receiver system is developed. This system is designed based on the link and design scheme of satellite-based laser communication, incorporating adaptive optics (AO) technology. It consists of four units: Cassegrain antenna with common aperture spectral detection, precision tracking tilt mirror, ultra-precision tracking AO, and AO wavefront detection. The antenna objective utilizes a coaxial Cassegrain structure combined with a refractor group to form a Kepler telescopic structure that considers volume and pupil distance requirements. To address optical axis correction issues causing pupil plane drift, a 4f system is implemented between the precise tracking tilt mirror and AO tilt mirror. Additionally, a double telecentric system is employed between the wavefront detector and deformable mirror to establish conjugate relationship and minimize axial error in wavefront detection. Optical passive methods are utilized in designing these four units to improve temperature adaptability of the system. Experimental results demonstrate that each element's wave aberration falls within $1/10\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm) range at temperatures ranging from 10 °C to 30 °C, meeting design specifications while offering valuable references for engineering applications.

Key words satellite-ground laser communication; Coude optical path; athermalization; double telecentric optical path; adaptive optic

1 引言

随着测绘卫星、导航卫星、深空行星探测器的发展,以及超光谱成像和合成孔径雷达在卫星平台上的

应用^[1-2],传统星地微波通信方式已不能满足星地间高速性、保密性的数据传输需求。激光通信技术具有大容量、高速率、高保密性、低功耗等优势,是解决星地间数据传输问题的有效途径^[3-4]。2021年,美国国家航空航

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-01-28; 录用日期: 2024-02-03; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62275033)、国家自然科学基金青年基金资助项目(62205032)、吉林省科技发展计划项目(20210201139GX)、吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220749KJ)

通信作者: *custslx@126.com

天局(NASA)研制了激光通信中继演示终端(LCRD),该星载终端可与位于加利福尼亚口径为 1 m 的光学地面站 1(OGS1)及位于夏威夷口径为 0.5 m 的光学地面站 2(OGS2)同时进行激光通信^[5]。两个光学地面站都采用了高阶自适应光学(AO)系统,通信速率达到了 100 Gbit/s。2023 年,该机构又通过红外传输载荷(TBIRD)实现了 200 Gbit/s 的高速通信^[6]。2018 年,中国科学院光电技术研究所研制的 1.8 m 口径的地面站与航天五院西安分院研制的北斗 M17 和北斗 M18 成功完成在轨激光通信实验,验证了地面站的捕获、对准、跟踪(APT)系统性能^[7]。2023 年,中国科学院空天信息创新研究院研制的 500 mm 口径地面终端与吉林一号 MF02A04 开展了星地激光通信实验,通信速率达到 10 Gbit/s^[6]。2018 年,张家齐等^[8]设计了一套二次成像型库德式激光通信系统,均方根(RMS)波像差优于 $1/10\lambda$,该系统设计了一级粗跟踪系统,但大气湍流对星地激光通信、跟踪捕获的影响是不容忽视的。在星地激光跟踪捕获、通信过程中,大气湍流会造成光强起伏、波前相位抖动、光束闪烁、光束扩散、功率衰减、频率偏移等一系列误差,会对系统通信、跟踪工作等产生较大影响。

针对上述星地激光通信问题及研究现状,为实现 500 km 轨道高度星地激光通信及信标光捕获,本文设计了一套 500 mm 口径星地激光通信地面接收端系统。该系统采用大口径接收方案,以提高系统捕获分辨率及探测灵敏度,增强靶面接收光强的稳定性,并在大口径接收方案基础上引入自适应光学^[9-11],对波前进行实时探测和校正,修正跟踪残差,降低大气湍流的影响。系统采用卡塞格林天线对信号光和信标光进行探测,通过倾斜镜精跟踪单元对粗跟踪残差进行抑制,通

过 AO 超精跟踪单元和 AO 波前探测单元对大气湍流造成的波前畸变进行校正。倾斜镜精跟踪单元理论跟踪精度为 $16.3 \mu\text{rad}$,AO 超精跟踪单元理论跟踪精度为 $6.2 \mu\text{rad}$ 。 $10^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内,各单元 RMS 波像差测试结果优于 $1/10\lambda$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),各单元温度范围内波像差变化较小,满足消热差设计要求,能对星地激光通信地面接收端系统设计提供一定的参考。

2 系统方案设计

针对传统激光通信终端构型稳定性差、旋转半径大等弊端,本文采用兼备十字跟踪架式和潜望镜式两种构型优势的库德式结构^[12-13],使地面端在相同天线口径下具有更小的运动包络,且光学系统不随负载运动,可提高系统稳定性和负载动态跟踪性能。针对传统卡式天线出瞳较短,各视场光束经过出瞳后迅速发散,造成后续光学系统冗杂的问题,本文采用二次成像型库德式光路形式,延长出瞳至倾斜镜位置,缩小后续元件口径,降低系统复杂度。

星地激光通信系统跟踪一般分为 4 级^[7]:第一级为卫星轨道预报,根据卫星轨道参数确定卫星某时刻的坐标方位;第二级为大视场相机粗跟踪单元,通过控制转台调整俯仰轴和方位轴将图像保持在相机靶面中心,实现大视场捕获粗跟踪;第三级为小视场倾斜镜精跟踪单元,通过算法提取精跟踪相机靶面光斑位置,反馈给倾斜镜做出相应调整,实现小视场捕获精跟踪;第四级为 AO 单元,包括 AO 超精跟踪及 AO 波前探测两个子单元,该单元能对大气湍流造成的波前畸变进行补偿,是建立通信链路重要的一部分。光学系统方案如图 1 所示。

本文设计的地面端结构布局如图 2 所示。为保证

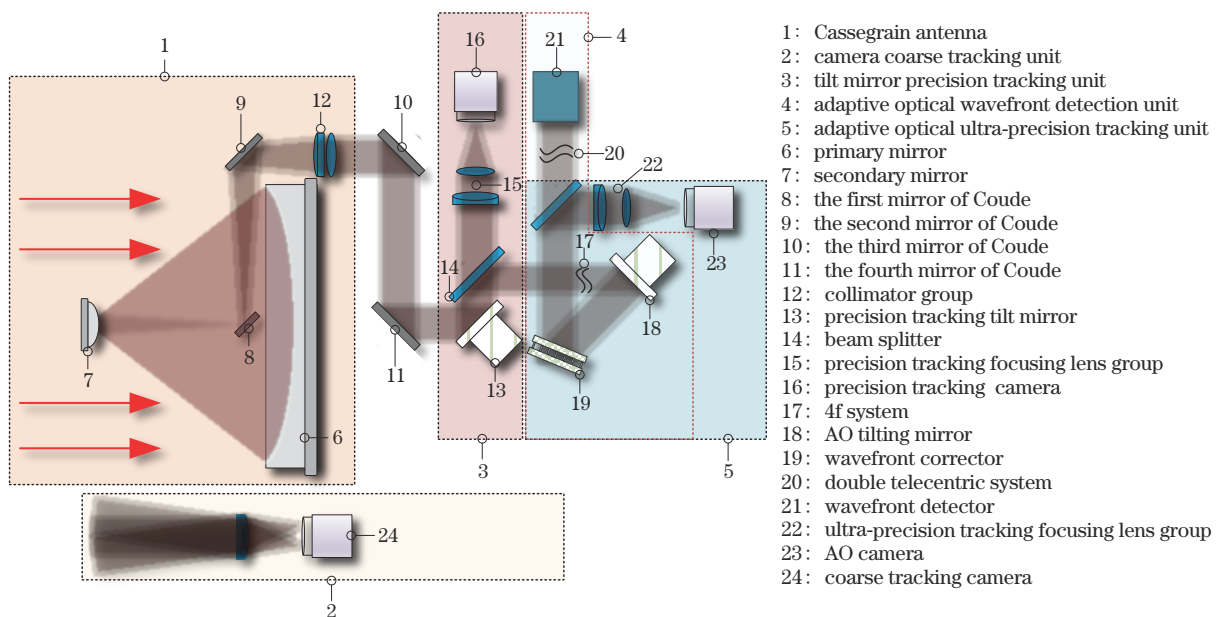
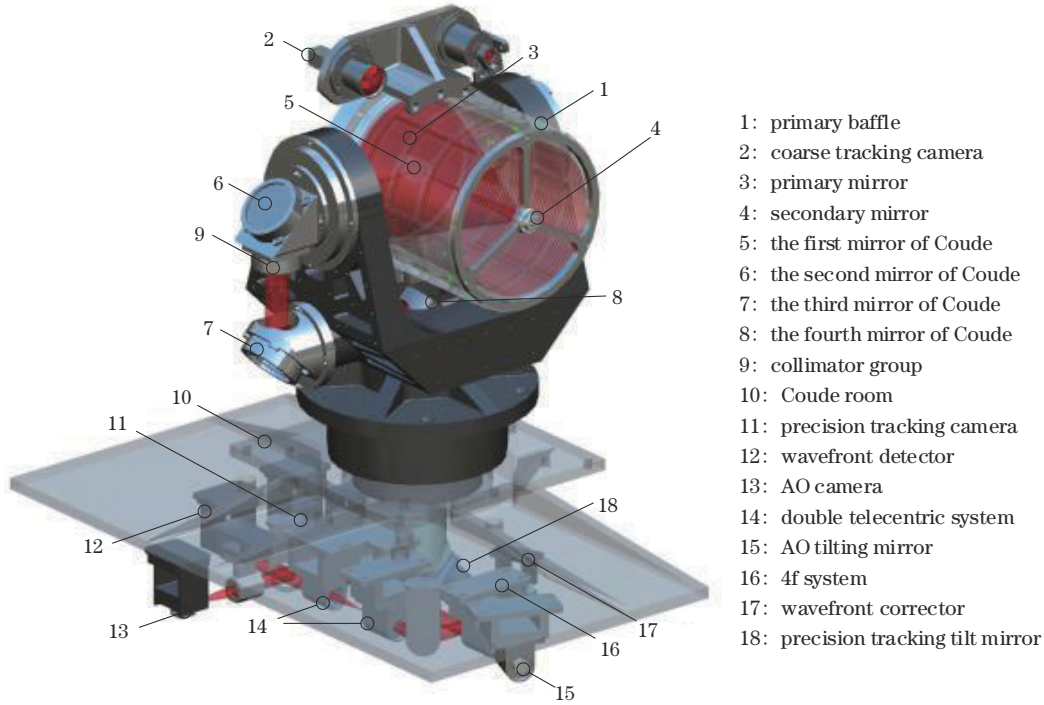


图 1 光学系统方案

Fig. 1 Diagram of optical system scheme



- 1: primary baffle
- 2: coarse tracking camera
- 3: primary mirror
- 4: secondary mirror
- 5: the first mirror of Coude
- 6: the second mirror of Coude
- 7: the third mirror of Coude
- 8: the fourth mirror of Coude
- 9: collimator group
- 10: Coude room
- 11: precision tracking camera
- 12: wavefront detector
- 13: AO camera
- 14: double telecentric system
- 15: AO tilting mirror
- 16: 4f system
- 17: wavefront corrector
- 18: precision tracking tilt mirror

图 2 地面终端结构图

Fig. 2 Diagram of ground terminal structure

系统设计的合理性,设计过程中各光路需要满足以下原则:1)地面接收端光学系统视场角必须与星载发射端通信、信标光光束发散角相匹配^[14];2)根据光斑识别特征要求和CMOS工作特性,设计时需要保持光斑在不同温度、视场下的大小、形状的一致性^[15];3)考虑地面终端环境温度对光学系统像质的影响,需要对系统进行消热差设计^[16-17];4)为避免瞳面漂移造成光斑抖动,设计时需要保持主镜、精跟踪倾斜镜、AO倾斜镜的共轭关系。

3 光学系统设计

3.1 参数分析

根据星地激光通信系统实际需求及应用场景,确定系统指标及要求:

1)综合分析系统光学增益、大气信道传输特性等因素,确定通信光为1550 nm,信标光为808 nm。激光通信链路传输模型^[18]为

$$P_r = P_t \cdot \eta_{ot} \cdot \eta_{or} \cdot \eta_s \cdot \exp\left[-8\left(\frac{\theta_{off}}{\theta_{div}}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{D}{\theta_{div} \cdot L}\right)^2, \quad (1)$$

式中: P_r 为接收信号功率; P_t 为发射信号功率; η_{ot} 为发射单元透过率; η_{or} 为近轴光学系统由畸变引起的光强

损失; η_s 为信道衰减引起的功率损失; θ_{off} 为跟踪误差; θ_{div} 为功率下降到 $1/e^2$ 对应的激光束散角。由上式可知,除各类系统损耗外,其他链路损失均受有效接收口径影响。为提高接收光功率,需要尽可能增大光学天线口径,结合加工难度,确定光学天线有效口径为500 mm;综合考虑后续子光路口径和系统体积,确定天线缩束倍率为10。

2)为降低功率损耗,最终精度需要小于1/10通信光发散角^[14]。星载终端天线口径为55 mm,通信光波段为1550 nm,简单计算可得光学天线衍射极限角为68.8 μ rad。当通信光以衍射极限角发射时,地面终端最终跟踪精度应优于6.88 μ rad。根据系统跟踪精度要求,确定倾斜镜精跟踪单元全视场为650 μ rad,跟踪精度优于34.0 μ rad、AO超精跟踪单元全视场为180 μ rad,跟踪精度优于6.8 μ rad。

3)实际工程中,环境温度的均匀改变会导致光学元件的曲率半径、厚度、折射率发生改变,进而使系统产生离焦和像差。采用光学被动式消热差方法对光学系统进行设计,保证在10 $^{\circ}$ C~30 $^{\circ}$ C范围内,系统RMS波像差测试结果优于 $1/10\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)。根据上述要求及分析,各单元设计指标如表1、2所示。

表1 卡塞格林天线单元设计指标

Table 1 Design parameters of Cassegrain antenna reduction unit

| Antenna aperture / mm | Field / μ rad | Magnification factor | Operating wavelength / nm | Temperature range / $^{\circ}$ C |
|-----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 500 | 650 | 10 | 1550, 808 | 10~30 |

3.2 卡塞格林天线单元设计

卡塞格林天线单元包括卡塞格林天线和准直镜组

两部分,天线主镜为抛物面,次镜为双曲面,通信光为1550 nm,信标光为808 nm,全视场角为650 μ rad。考

表 2 倾斜镜精跟踪、AO 超精跟踪单元设计指标

Table 2 Design parameters of tilting mirror precision tracking, AO ultra-precision tracking unit

| Tracking unit | Field / μrad | Operating wavelength /nm | Tracking accuracy / μrad | Temperature range / $^{\circ}\text{C}$ |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Tilted mirror precision tracking | 650 | 808 | 34.0 | 10–30 |
| AO ultra-Precise tracking | 180 | 808 | 6.8 | 10–30 |

考虑系统复杂程度及加工难度,本文中主镜相对口径选取 1:1.32,主镜口径为 500 mm,简单计算可得主镜焦距为 660 mm,曲率半径为 1320 mm。为使系统结构紧凑,将一次像点设计在主镜左侧 100 mm 处。均衡遮拦比和装调难度,选取系统遮拦比为 1/10,则次镜口径为 50 mm。次镜其他参数表达式^[19]为

$$\beta = \frac{f_1(1-\alpha) + \Delta}{\alpha f_1}, \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta+1} R_1, \quad (3)$$

$$e_2^2 = \frac{(1-\beta)^2}{(1+\beta)^2}, \quad (4)$$

式中: β 为次镜放大倍率; f_1 为主镜焦距; α 为遮拦比; Δ

为一次像点伸出量; R_2 为主镜曲率半径; R_1 为次镜曲率半径; e_2^2 为次镜二次曲面系数。代入参数计算可得,次镜放大倍率为-7.48,次镜曲率半径为 152 mm,次镜二次曲面系数为 1.713。

将以上计算参数带入设计软件中得到初始结构。优化过程中,将二次像点位置设计在库德 1 镜附近,可缩小反射镜后口径、降低库德 1 镜的对主镜的遮拦影响。为延后出瞳位置,需增大望远部分与准直镜组的间隔,但准直镜组的口径也会随着与望远部分间隔的增大而增大,经过反复设计和对比,最终确定准直镜组位于二次焦点后 757.5 mm,出瞳距离为 1855 mm。库德 1 镜到库德 2 镜间隔 625 mm,库德 2 镜到库德 3 镜间隔 520.8 mm,库德 3 镜到库德 4 镜间隔 625 mm,库德 4 镜到倾斜镜间隔 898 mm,优化后光路如图 3 所示。

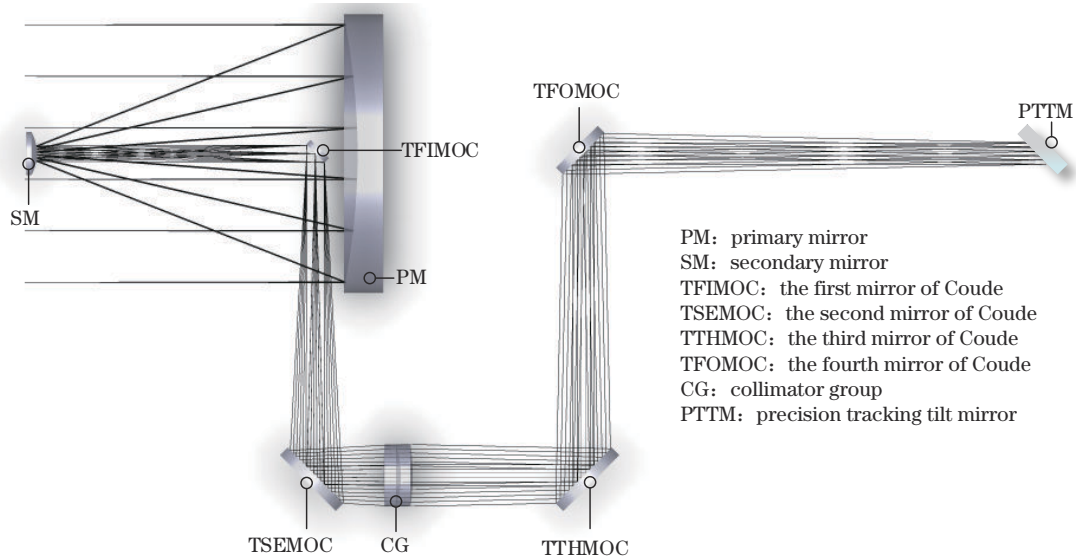


图 3 卡塞格林天线单元光路图

Fig. 3 Diagram of Cassegrain antenna unit optical path

利用光学设计软件对 10 $^{\circ}\text{C}$ 、15 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ 、25 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 等 5 个温度结构下的光学系统进行消热差设计。使用光学设计软件中的锤形优化功能,对各个温度下的结构参数进行优化,匹配光学元件材料组合,使光学元件与机械结构产生的离焦量相互抵消,达到消热差效果。分析图 4(a)可知:325 μrad 、10 $^{\circ}\text{C}$ 时 RMS 波像差最大,为 0.0512 λ ($\lambda=808\text{ nm}$);0 μrad 、20 $^{\circ}\text{C}$ 时 RMS 波像差最小,为 0.0413 λ ($\lambda=808\text{ nm}$),温度范围内 RMS 波像差变化较小。分析图 4(b)可知,系统全视场(650 μrad)弥散斑小于艾里斑直径,接近衍射极限,系统像质良好,满足设计要求。

3.3 倾斜镜精跟踪单元光学系统设计

根据光学系统方案,设计相应的倾斜镜精跟踪光学系统。精跟踪相机开窗靶面对角线尺寸为 2.6 mm,像元尺寸为 6.5 μm ,全视场为 650 μrad ,天线缩束倍率为 10,镜组焦距计算如下:

$$f = \frac{y}{M \tan \omega}, \quad (5)$$

式中: y 为靶面对角线尺寸一半; f 为聚焦镜组焦距; ω 为视场半角; M 为天线放大倍率。计算可得,倾斜镜精跟踪镜组焦距为 400 mm,则跟踪精度为 16.3 μrad 。天线放大倍率为 10,则倾斜镜精跟踪单元总焦距为 4000 mm。优化后的系统光路如图 5 所示。

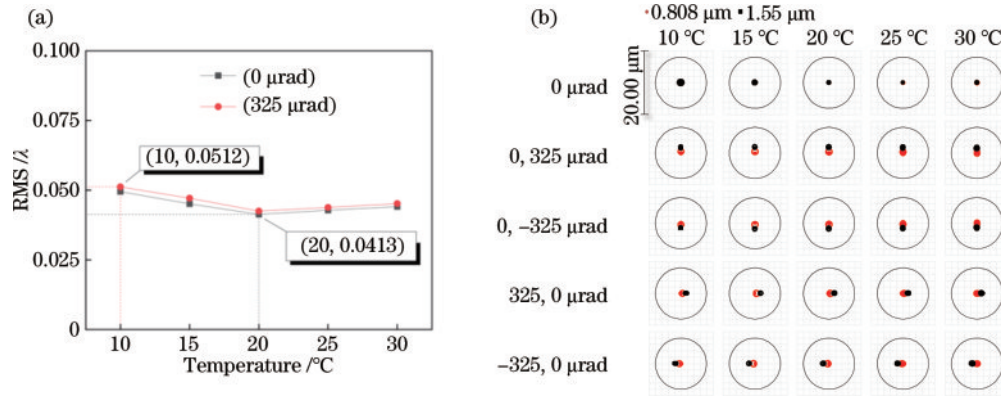


图 4 卡塞格林天线单元性能图。(a) RMS 波像差曲线图; (b) 点列图

Fig. 4 Performance diagrams of Cassegrain antenna unit. (a) Diagram of RMS wave aberration curve; (b) spot radius

对 10 °C、15 °C、20 °C、25 °C、30 °C 等 5 个温度结构下的光学系统进行消热差设计, 系统性能如图 6 所示。由图 6(a) 可知: 325 μrad、10 °C 时 RMS 波像差最大, 为 0.0575λ (λ=808 nm); 0 μrad、20 °C 时 RMS 波像差最

小, 为 0.0458λ (λ=808 nm), 温度范围内波像差变化较小。图 6(b) 系统全视场 (±325 μrad) 范围内弥散斑小于艾里斑直径, 接近衍射极限且不同视场下光斑大小、形状具有较好一致性。

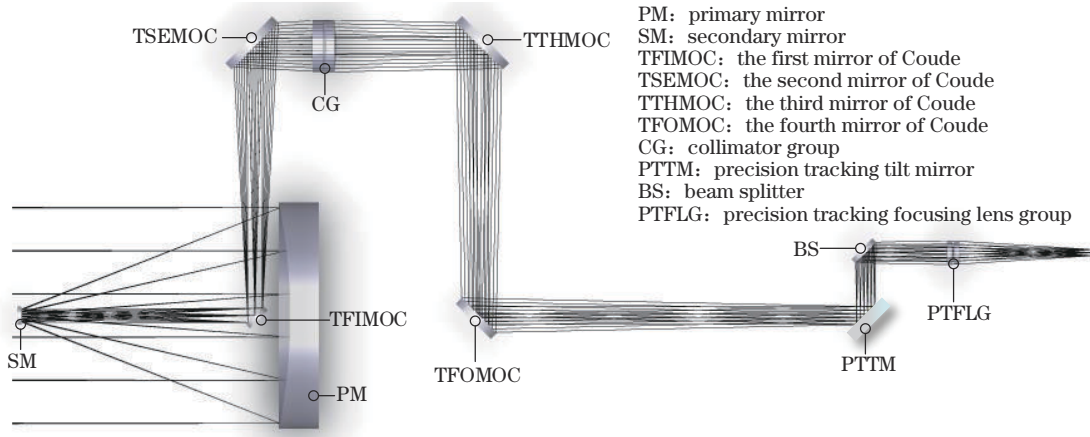


图 5 倾斜镜精跟踪单元光路图

Fig. 5 Diagram of tilted mirror precision tracking unit optical path

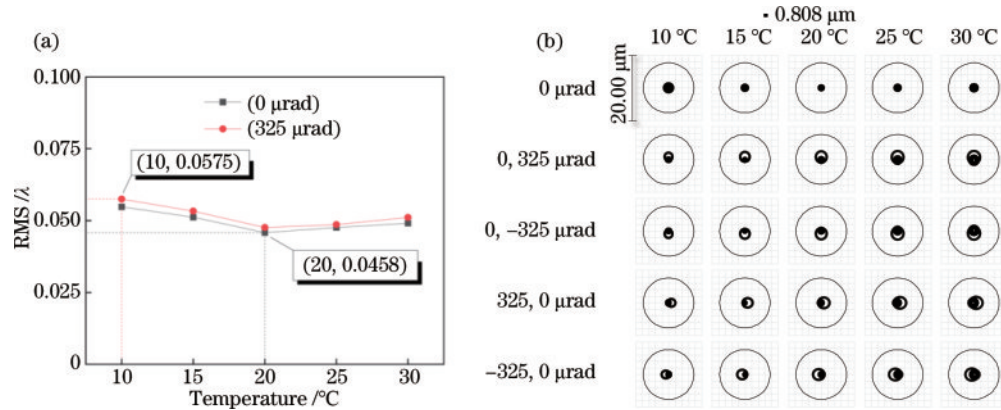


图 6 倾斜镜精跟踪单元性能图。(a) RMS 波像差曲线图; (b) 点列图

Fig. 6 Performance diagrams of tilting mirror precision tracking unit. (a) Diagram of RMS wave aberration curve; (b) spot radius

3.4 AO 超精跟踪单元光学系统设计

在 AO 超精跟踪单元中, 需要利用 4f 系统对瞳面进行转换, 将 AO 倾斜镜放置于 4f 系统出瞳位置,

以降低倾斜镜校正光束时, 光束横向位移造成的瞳面漂移影响。此外, 为匹配后续单元器件口径, 还需对光束进行缩束, 4f 系统缩束比为 1.5:1。系统

光路如图 7 所示,前组焦距为 142.4 mm,后组焦距为 91.9 mm。AO 超精跟踪相机开窗后靶面对角线尺寸为 1.9 mm,像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$,全视场为 $180 \mu\text{rad}$,代入式(2)~(4),计算可得 AO 超精跟踪

单元总焦距为 10555.6 mm,AO 超精跟踪聚焦镜组焦距为 1055.6 mm,跟踪精度为 $6.2 \mu\text{rad}$,系统跟踪精度优于 $6.8 \mu\text{rad}$,满足设计要求。AO 超精跟踪光路如图 8 所示。



图 7 4f 系统光路图

Fig. 7 Diagram of 4f system optical path

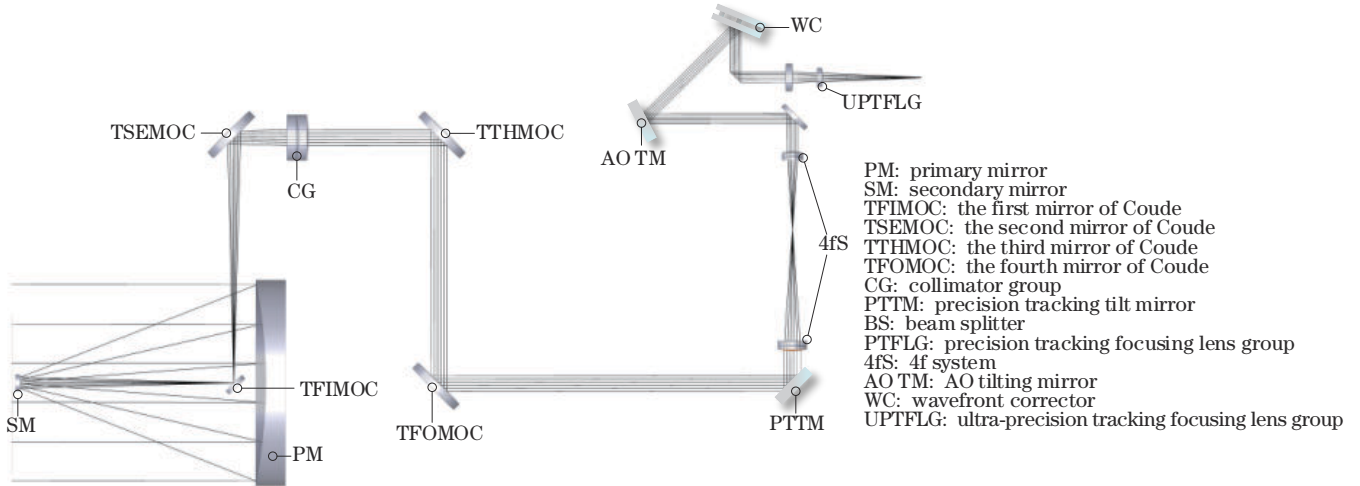


图 8 AO 超精跟踪单元光路图

Fig. 8 Diagram of AO ultra-precision tracking unit optical path

由图 9(a)可知: $90 \mu\text{rad}$ 、 30°C 时 RMS 波像差最大,为 0.0489λ ($\lambda=808 \text{ nm}$); $0 \mu\text{rad}$ 、 20°C 时 RMS 波像差最小,为 0.0436λ ($\lambda=808 \text{ nm}$),满足设计要求。

图 9(b)系统全视场 ($\pm 90 \mu\text{rad}$) 弥散斑小于艾里斑直径接近衍射极限且不同视场下光斑大小、形状具有高度的一致性。

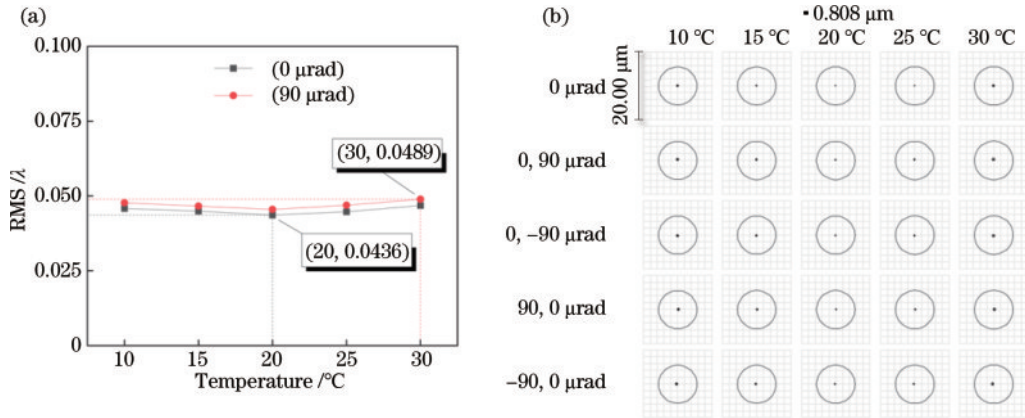


图 9 AO 超精跟踪单元性能图。(a) RMS 波像差曲线图; (b) 点列图

Fig. 9 Performance diagrams of AO ultra precision tracking unit. (a) Diagram of RMS wave aberration curve; (b) spot radius

3.5 AO 波前探测单元光学系统设计

所提方案采用微透镜阵列与 CCD 探测器组成的夏克-哈特曼传感器作为自适应光学系统的波前探测器。为保持 AO 变形镜与微透镜之间的共轭关系,降低两者轴向偏差所产生的测量误差影响,在两者之间设计了双远心镜头。其主体为开普勒式望远结

构,物镜组的后焦点和目镜组的前焦点重合,光阑位于物方焦平面和像方焦平面处,对应的入瞳与出瞳均处于无穷远处。变形镜口径为 22.5 mm,相机靶面尺寸为 $17.92 \text{ mm} \times 14.34 \text{ mm}$,为保证物方视场全覆盖变形镜尺寸,确定物方线视场为 36 mm,像方线视场为 24 mm,则系统放大倍率为 -0.75 。工作距

离为 405 mm, 畸变小于 0.1%, 远心度小于 0.01°。将初始结构光学表面曲率半径、空气间隔、玻璃材料等设置为变量进行优化, 用操作数 PMAG 控制系统放大倍率, 操作数 DIMX 控制系统畸变, 操作数 REAC 控制最后面出射光线角度。以物方作为绝对远心, 像方主光线与光轴夹角为 0, 实现双远心功

能。使用锤形优化功能, 匹配不同光学元件材料组合, 消除热差影响。经过反复优化, 双远心系统前组焦距为 295.6 mm, 后组焦距为 221.9 mm, 总长为 643.6 mm, 双远心镜头结构如图 10 所示。将各组镜头与卡塞格林天线拼接, 得到的 AO 波前探测光路图如图 11 所示。



图 10 双远心镜头结构图

Fig. 10 Diagram of double telecentric lens

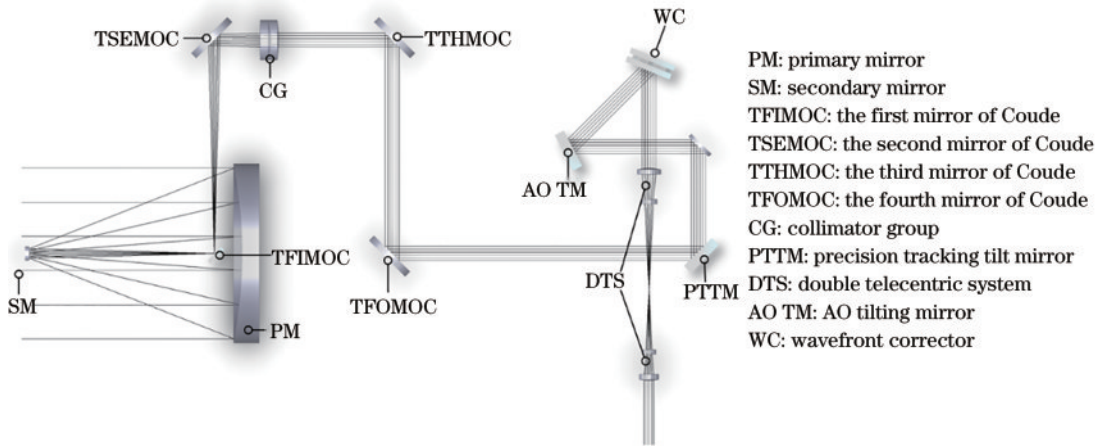


图 11 AO 波前探测单元光路图

Fig. 11 Diagram of AO wavefront detection unit optical path

探测相机靶面像元大小为 $14 \mu\text{m}$, 光学系统截止频率为 35.7 lp/mm 。如图 12(a) 所示, 系统最大畸变 0.08%, 满足小于 0.1% 的设计指标。图 12(b) 中系统调制传递函数曲线 (MTF) 值较为接近衍射极限, 各视

场均大于 0.2。表 3 中 H 代表物方归一化高度, 在 $0H$ 、 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.7H$ 、 $1H$ 时远心度均小于 0.01° 。如图 13 所示: $90 \mu\text{rad}$ 、 30°C 时, RMS 波像差最大, 为 0.0477λ ($\lambda=808 \text{ nm}$); $0 \mu\text{rad}$ 、 20°C 时, RMS 波像差最

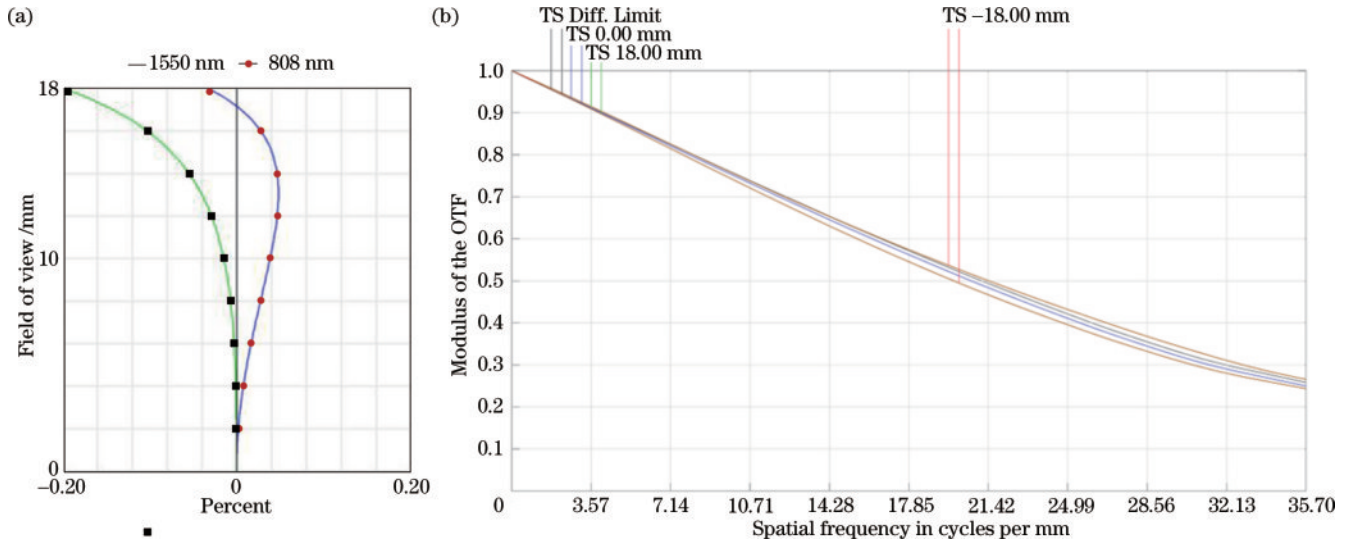


图 12 双远心系统性能图。(a) 畸变图; (b) MTF 曲线图

Fig. 12 Performance diagrams of double telecentric system. (a) Diagram of distortion; (b) diagram of MTF curve

表 3 双远心系统远心度
Table 3 System telecentricity

| Object height | 0H | 0.3H | 0.5H | 0.7H | 1H |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Telecentricity /($^{\circ}$) | 0.00561 | 0.00675 | 0.00858 | 0.00989 | 0.00658 |

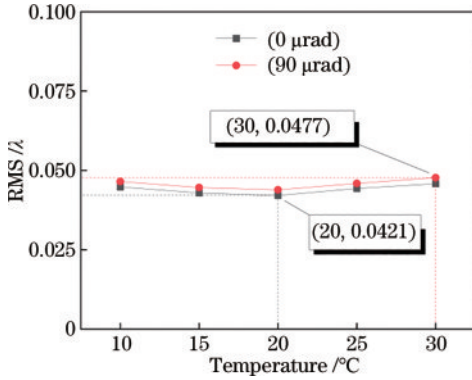


图 13 AO 波前探测单元 RMS 波像差曲线图

Fig. 13 RMS wavefront error curves of AO wavefront detection unit

小,为 $0.0421\lambda(\lambda=808\text{ nm})$,温度范围内 RMS 波像差变化范围较小,满足系统设计要求。

4 公差分析及实验

生产、加工、装配过程中各种误差会导致光学系统性能下降,为保证光学系统在实际应用中能够达到设计性能,根据光学系统计算误差、光学系统性能指标、公差敏感面、加工制造精度、装配精度等参数,确定光学元件的尺寸、形状、位置、折射率及镜组姿态等参数在加工、制造、装配过程中所允许的最大偏差范围,给定卡塞格林天线、倾斜镜精跟踪、AO 超精跟踪、AO 波前探测四个单元公差分配值如表 4~7 所示。

运用光学设计软件中的公差分析功能,根据表 4~7 公差分配值,对系统 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等 5 种温度结构下的波像差变化程度进行评价,经过 500 次蒙特卡罗随机样本分析,得到此公差标准下,系统波像差 90% 概率的仿真分析结果,如表 8 所示。分析可知,四个单元 5 种工作温度结构下各波长波像差变化较小,90% 概率低于 $1/10\lambda(\lambda=808\text{ nm}$ 、 $1550\text{ nm})$,满足系统消热差要求。

表 4 卡塞格林天线单元公差分配表

Table 4 Tolerance distribution table for Cassegrain antenna reduction unit

| Parameter | Displacement | |
|--------------------|----------------|------------------|
| | Primary mirror | Secondary mirror |
| Decenter X /mm | 0.02 | 0.02 |
| Decenter Y /mm | 0.02 | 0.02 |
| Decenter Z /mm | 0.02 | 0.02 |
| Tilted X /($''$) | 36 | 36 |
| Tilted Y /($''$) | 36 | 36 |
| Tilted Z /($''$) | 36 | 36 |
| Aperture | 2 | 2 |
| Local aperture | 0.2 | 0.2 |

表 5 倾斜镜精跟踪单元公差分配表

Table 5 Tolerance distribution table for tilting mirror precision tracking unit

| Parameter | Displacement | | | |
|------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| | Surface 1 | Surface 2 | Surface 3 | Surface 4 |
| Decenter /mm | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Thickness /mm | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Tilted /($''$) | 90 | 90 | 90 | 90 |

表 6 AO 超精跟踪单元公差分配表

Table 6 Tolerance distribution table for AO ultra-precision tracking unit

| Parameter | Displacement | | | |
|------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| | Surface 1 | Surface 2 | Surface 3 | Surface 4 |
| Decenter /mm | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Thickness /mm | 0.0375 | 0.0375 | 0.0375 | 0.0375 |
| Tilted /($''$) | 60 | 60 | 60 | 60 |

表 7 AO 波前探测单元公差分配表

Table 7 Tolerance distribution table for AO wavefront detection unit

| Parameter | Displacement | | | |
|------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| | Surface 1 | Surface 2 | Surface 3 | Surface 4 |
| Decenter /mm | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Thickness /mm | 0.0375 | 0.0375 | 0.0375 | 0.0375 |
| Tilted /($''$) | 60 | 60 | 60 | 60 |

波像差检测如图 14 所示,实验装置从左至右依次

表 8 各单元仿真分析结果

Table 8 Table of simulation analysis results of each unit

unit: λ

| Temperature / $^{\circ}\text{C}$ | Displacement | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Cassegrain antenna | | Tilt mirror precision tracking | AO ultra-precision tracking | AO wavefront detection |
| | $\lambda=808\text{ nm}$ | $\lambda=1550\text{ nm}$ | unit($\lambda=808\text{ nm}$) | unit($\lambda=808\text{ nm}$) | unit($\lambda=808\text{ nm}$) |
| 10 | 0.061 | 0.039 | 0.069 | 0.064 | 0.063 |
| 15 | 0.058 | 0.035 | 0.067 | 0.061 | 0.059 |
| 20 | 0.057 | 0.032 | 0.063 | 0.059 | 0.055 |
| 25 | 0.056 | 0.029 | 0.061 | 0.059 | 0.053 |
| 30 | 0.058 | 0.031 | 0.065 | 0.061 | 0.057 |

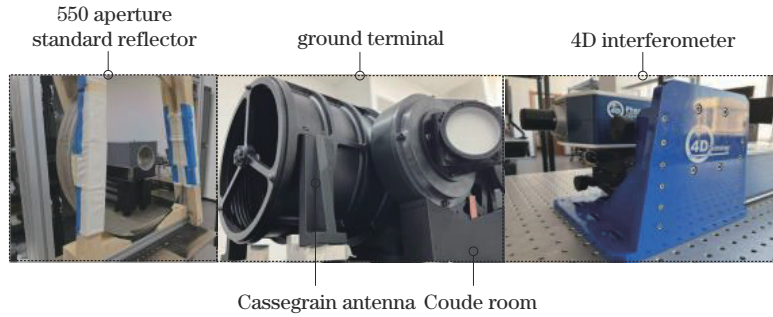


图 14 波像差检测实验图

Fig. 14 Diagram of wavefront detection experiment

为 550 mm 口径标准反射镜、地面接收终端、4D 干涉仪。使用室温控制器控制超净室内温度分别达到 10 °C、15 °C、20 °C、25 °C、30 °C 等 5 个节点,并保持节点温度恒定,用红外测温仪对地面接收终端各元件进行测温,当各元件达到节点温度并稳定时,用 4D 干涉仪对各单元波像差采样测量。

实验结果如图 15 所示。4D 干涉仪工作波长为 632.8 nm,卡塞格林天线单元 10 °C 时 RMS 波像差最

大,为 0.0856λ,较 20 °C 时增大 0.0127λ;倾斜镜精跟踪单元 10 °C 时 RMS 波像差最大,为 0.0983λ,较 20 °C 时增大 0.0099λ;AO 超精跟踪单元 10 °C 时 RMS 波像差最大,为 0.0958λ,较 20 °C 时增大 0.0063λ;AO 波前探测单元 10 °C 时 RMS 波像差最大为 0.0911λ,较 20 °C 时增大 0.0043λ。综合以上分析结果可知,各单元 RMS 波像差均优于 1/10λ(λ=632.8 nm),各单元波像差随温度变化波动较小,具有良好的系统性能和温度适应性

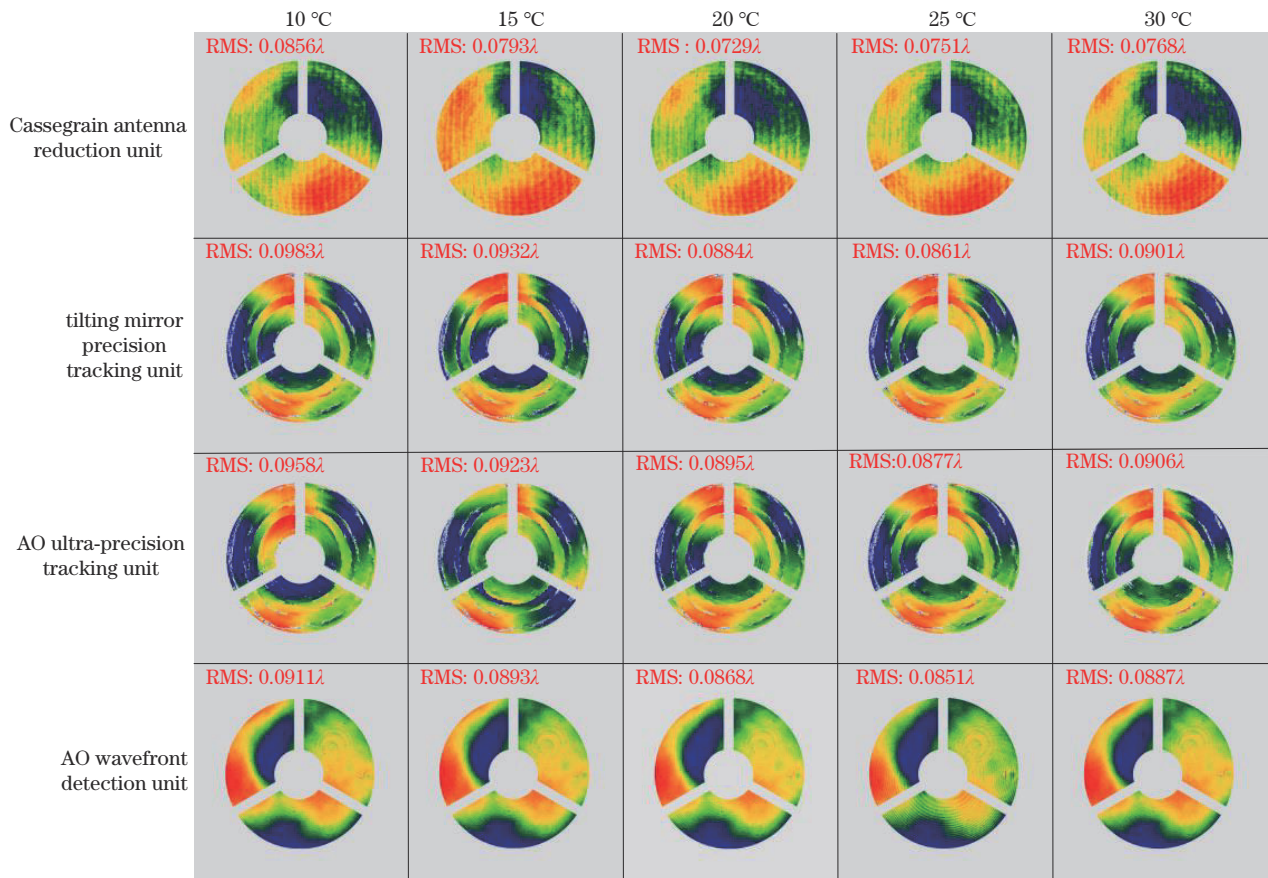


图 15 实验结果图

Fig. 15 Diagram of test results

5 结 论

本文结合自适应光学技术设计了一套 500 mm 口径星地激光通信地面端系统,包含卡塞格林天线、倾斜

镜精跟踪、AO 超精跟踪、AO 波前探测等 4 个单元。卡塞格林天线出瞳距离为 1855 mm,倾斜镜精跟踪单元跟踪精度达到 16.3 μrad, AO 超精跟踪单元跟踪精度达到 6.2 μrad。公差仿真分析结果表明:各单元公差良

好,波像差均优于 $1/10\lambda(\lambda_1=808\text{ nm},\lambda_2=1550\text{ nm})$,具备加工制造可行性。实验结果表明:10℃~30℃范围内,各单元波像差随温度变化较小,具有良好温度适应性,RMS波像差优于 $1/10\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。相较于国内外研究成果,本文设计的500 mm口径星地激光通信地面终端系统跟踪精度较高、像质良好、温度适应性强,具有一定的工程借鉴意义。但文中未对系统自适应校正能力进行深入研究,下一步将对此开展深入研究。

参 考 文 献

- [1] 谢珊珊,梁晓莉.国外卫星激光通信技术发展分析[J].中国航天,2021(12):42-46.
Xie S S, Liang X L. Development analysis of foreign satellite laser communication technology[J]. Aerospace China, 2021(12): 42-46.
- [2] 张艺斌,邓汝杰,刘河山,等.太极计划星间激光通信参数设计及实验验证[J].中国激光,2023,50(23):2306002.
Zhang Y B, Deng R J, Liu H S, et al. Parameter design and experimental verification of taiji program inter-satellite laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(23): 2306002.
- [3] Liu Z H, Lin C W, Chen G. Development and trend of space-based information network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1544(1): 012180.
- [4] 任伟杰,孙建锋,周煜,等.多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J].光学学报,2023,43(12):1206002.
Ren W J, Sun J F, Zhou Y, et al. Multi-system compatible coherent detection technology of satellite laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1206002.
- [5] Roberts L C, Meeker S R, Tesch J, et al. Performance of the adaptive optics system for Laser Communications Relay Demonstration's Ground Station 1[J]. Applied Optics, 2023, 62(23): G26-G36.
- [6] 张家铭.卫星激光通信网络研究进展[J].光通信技术,2023,47(5):37-44.
Zhang J M. Research progress of satellite laser communication network[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(5): 37-44.
- [7] 陈莫.基于大口径望远镜的星地激光通信地面站关键技术研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2019:26-29.
Chen M. Research on the key technologies of large aperture telescope ground station for satellite-to-ground laser communications[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 26-29.
- [8] 张家齐,张立中,董科研,等.二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术[J].中国光学,2018,11(4):644-653.
Zhang J Q, Zhang L Z, Dong K Y, et al. Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal[J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 644-653.
- [9] 徐月,刘超,兰斌,等.自适应光学在星地激光通信中的研究进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(5):0500004.
Xu Y, Liu C, Lan B, et al. Research progress of adaptive optics in satellite-to-ground laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 0500004.
- [10] Osborn J, Townson M J, Farley O J D, et al. Adaptive Optics pre-compensated laser uplink to LEO and GEO [J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6113-6132.
- [11] 周畅,于笑楠,姜会林,等.基于APD自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J].中国激光,2022,49(4):0406002.
Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406002.
- [12] 董景峰,周维虎,纪荣祎,等.激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J].光学精密工程,2016,24(2):309-318.
Dong D F, Zhou W H, Ji R Y, et al. Design of precise tracking system of laser tracker[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 309-318.
- [13] 白杨杨,陈力兵,孟立新,等.库德式激光通信终端粗跟踪技术[J].兵工学报,2021,42(9):1931-1939.
Bai Y Y, Chen L B, Meng L X, et al. Coarse tracking technology of coude-type laser communication terminal [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9): 1931-1939.
- [14] 王蕴琦,刘伟奇,付瀚毅,等.离轴式共口径激光通信光学系统设计[J].激光与光电子学进展,2018,55(1):010602.
Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, et al. Design of laser communication optical system with off-axis common aperture [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 010602.
- [15] 雷景文.空间激光通信光学系统设计及其偏振特性研究[D].长春:吉林大学,2021:29-46.
Lei J W. Study on the optical system design and its polarization characteristics of space laser communication [D]. Changchun: Jilin University, 2021: 29-46.
- [16] 李康,周峰,王保华,等.制冷型被动式消热差红外光学系统设计[J].中国光学,2023,16(4):853-860.
Li K, Zhou F, Wang B H, et al. Passive athermalization design of a cooled infrared optical system[J]. Chinese Optics, 2023, 16(4): 853-860.
- [17] 李响,刘赫,高亮,等.复合式激光通信系统多光轴一致性温度影响研究[J].光学学报,2022,42(18):1806002.
Li X, Liu H, Gao L, et al. Temperature influence of multi-optical axis consistency in compound laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1806002.
- [18] 姜会林,佟首峰,张立中,等.空间激光通信技术与系统[M].北京:国防工业出版社,2010:74-89.
Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z, et al. The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 74-89.
- [19] 赵意意.空间相干光通信终端光学系统研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2015:56-58.
Zhao Y Y. Study on the optical system of space coherent optical communication terminal[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 56-58.