

文章编号 1004-924X(2023)23-3426-12

## 轻小型量子跟踪仪接收望远镜

孙景旭<sup>1\*</sup>, 费 强<sup>1</sup>, 周 峰<sup>2</sup>, 陈太喜<sup>1</sup>, 谢虹波<sup>1</sup>, 王 芳<sup>1</sup>, 隋晓东<sup>3</sup>

(1. 季华实验室, 广东 佛山 528200;

2. 中国人民解放军 96035 部队, 吉林 吉林 132101;

3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**随着量子保密通信网络及产业化发展,轻小型化接收望远镜满足量子跟踪仪规模化和便携式的多应用场景需求。对满足接收望远镜的技术体制进行了对比分析,确定了RC+小像元+量子模块的光学系统形式,采用小 $F$ 数+微小像元的技术体制。设计了全铝一体化结构的 $\phi 280$ 量子跟踪仪接收望远镜,F5的RC望远镜采用RSA-6061微晶铝合金作为反射镜的结构材料,配合一体化硬铝合金高刚性结构,静力学(重力变形和温度变形)仿真分析结果满足近衍射极限成像和高效率量子接收要求,动力学仿真分析结果表明,一阶模态为91 Hz,具有足够高的动态刚度和安全冗余。集成测试结果表明:望远镜的中心视场波像差RMS为 $\lambda/14.7$ ,5个视场系统波像差均优于 $\lambda/12.7$ ,可以确保近衍射极限高质量信标成像,奈奎斯特频率处的光学传递函数为0.15;HV+—四个偏振态的平均偏振对比度为454,全系统效率为51.93%,可以高质量接收量子密钥;−25℃和+30℃外场恒星成像实验验证了系统可以稳定、高质量提取质心用于脱靶量闭环;与“墨子号”星地量子密钥分发实验成码为92.9 kb,误码率为1.18%,能够实现高效率量子接收。

**关 键 词:**量子通信;轻小型;量子跟踪仪;高刚性;量子密钥分发

**中图分类号:**TH743;TN918 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233123.3426

## Lightweight and miniaturized quantum tracker receiving telescope

SUN Jingxu<sup>1\*</sup>, FEI Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>2</sup>, CHEN Taixi<sup>1</sup>, XIE Hongbo<sup>1</sup>,  
WANG Fang<sup>1</sup>, SUI Xiaodong<sup>3</sup>

(1. Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China;

2. No. 96035 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Jilin 132101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: sunjingxu2004@163.com

**Abstract:** With the development of quantum secure communication networks and industrialization, there is an urgent need for lightweight and miniaturized receiving telescopes for scalable and portable multiple application scenario requirements of quantum tracking instruments. A detailed comparative analysis was performed on the technical systems that meet the requirements of receiving telescopes, the optical system form of the RC+micropixel+quantum module was determined, and the technical system of a small  $F\#$ +micro pixel was adopted. An all-aluminum  $\Phi 280$  quantum tracker receiving telescope was designed. The optical design results of RC telescope of F5 were obtained. Using RSA-6061 microcrystalline alumi-

收稿日期:2023-06-20;修订日期:2023-07-27.

基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(No. 2018B030328001)

num alloy as the structural material for the telescope mirror, coupled with an integrated hard aluminum alloy of high-rigidity structure, the static (gravity and temperature deformation) simulation analysis results met the requirements of near-diffraction limit imaging and high-efficiency quantum reception. The dynamic simulation analysis results demonstrated that the first mode was 91 Hz, which had a sufficiently high dynamic stiffness and safety redundancy. The integration test results show that: The wave aberration RMS of the central field of view of the telescope is  $\lambda/14.7$ , and the wavefront aberration of the five field of view systems is better than  $\lambda/12.7$ , which ensured high-quality beacon imaging near the diffraction limit. The measured optical transfer function at Nyquist frequency is 0.15; The average polarization contrast of the four polarization states (HV+-) of the telescope is 454, along with an overall system efficiency of 51.93%, which allows high-quality quantum key reception; The experimental results of external stellar imaging at 25 and +30 °C verified the stability of the system, which can be used for high-quality centroid extraction for off-target closed loop; The QKD experiment with Mozi obtains 92.9 kb codes, and the total bit error rate is 1.18%, allowing high-efficiency quantum reception.

**Key words:** quantum communication; lightweight and miniaturized; quantum tracker; high rigidity; quantum key distribution

## 1 引 言

信息安全关乎国计民生,大到国家政治经济,小到个人生活和工作。量子通信利用单光子不可分割和量子态不可克隆原理,即使窃密者截获链路上的部分光子,也无法准确获取光子状态信息,保障了量子通信的安全性<sup>[1]</sup>,给严峻的通信安全问题提供了一种全新的解决思路,是一种公认的保障信息安全的通信方式。量子通信主要包含量子保密通信、量子隐形传态、量子密集编码等研究方向,作为量子保密通信的一种,量子密钥分发在理论和实践中的研究最完善,是目前最主要的量子通信形式<sup>[2]</sup>。

自由空间中光子在大气中传输仅有一定损耗,使得量子密钥分发摆脱了距离的束缚,有助于建立覆盖全球的量子保密通信网络。自由空间量子通信主要借助量子跟踪仪来完成星地、星间或地地之间的通信链路。

欧洲 ESA 光学望远镜完成了多次量子通信实验,该望远镜位于西班牙的 Tenerife 岛,主镜口径为 1 016 mm,具有卡焦和库德焦点。主望远镜为极轴式结构,光学系统采用 R-C 结构形式。2007 年,欧洲联合实验室利用该望远镜实现了 144 km 自由空间纠缠光子分发和量子密钥

分发<sup>[3]</sup>。2013 年,德国宇航中心成功进行了飞机与地面站的量子密钥分发实验,量子通信距离约为 20 km,接收望远镜口径为 400 mm,粗、精跟踪探测器分别采用 InGaAs 焦面阵列和四象限,密钥接收视场为 83  $\mu\text{rad}$ <sup>[4-5]</sup>。2011 年,由中国科技大学、中国科学院上海技术物理所和中国科学院光电技术研究所等组成联合团队,在青海湖使用 670 mm 口径接收望远镜,在国际上首次成功实现了基于四光子纠缠的 97 km 自由空间量子态隐形传输,并首次实现百公里双向纠缠分发和 Bell 不等式检验,完成了星地量子通信可行性的全方位地面验证<sup>[6]</sup>。

大多数国家基于体积庞大的天文望远镜实现星地量子通信。然而,量子通信产业化发展及大规模应用亟需轻小型量子接收望远镜,以满足小型化、模块化和便携式的多应用场景需求。随着量子通信方式的不断拓展,研究轻小型量子跟踪仪<sup>[7]</sup>创新型的接收望远镜具有重要的应用价值和工程借鉴意义。本文研制了轻小型量子跟踪仪接收望远镜,实现了超轻量化和小型化总体设计,满足量子通信产业化发展及大规模应用的需求。该望远镜具有宽域温度范围(-40~+60 °C)及高质量光学精度保持(信标成像与高效率量子接收),能够实现高偏振对

比度、高效率 and 近衍射极限成像质量的综合匹配。

## 2 原 理

目前,主流量子接收望远镜主要采用大  $F$  数十大像元的技术体制,大  $F$  数势必带来长焦距,望远镜体积和质量无法优化至轻小型的量级<sup>[8]</sup>。

小  $F$  数十小像元的成像优势明显,小像元必有短焦距、短筒长,该技术体制没有主流应用,主要是小像元成像时感光面减小,传递函数和信噪比下降,这对光电成像望远镜而言是难以接受的。采用小  $F$  数 RC 系统,进一步要求尽可能缩短光学长度,主镜的  $F$  数也相应减小,这意味着在同样的光学口径下,主镜半径减小,主镜的高次非球面更加内凹,导致高次非球面的陡度增加,即使采用最好的加工手段也很难达到面形精度要求,或不能收敛。此外,超轻量化的主镜镜壁很薄,粗加工时易破裂且易变形,超薄超陡高次非球面镜加工的工艺难度很大。

小  $F$  数十微小像元的技术体制相比大  $F$  数十大像元的优势,这里主要从望远镜的光学传递函数和信噪比两方面进行量化分析。

### 2.1 光学传递函数

$$MTF = \frac{2}{\pi} \cdot [\arccos \mu - \mu \sqrt{1 - \mu^2}], \quad (1)$$

其中:  $\mu = f/f_{oc}$ , 为归一化频率。

$$\frac{\partial MTF}{\partial F} = \frac{dMTF}{df_{oc}} \frac{\partial f_{oc}}{\partial F} = -\frac{4f\lambda}{\pi} \sqrt{1 - F^2 \lambda^2 f^2}, \quad (2)$$

其中:  $f$  为空间频率,  $f_{oc}$  为空间截止频率。

如式(2)所示,  $\partial MTF / \partial F < 0$ , MTF 随着  $F$  的减小而增大。采用小  $F$  数,可在高奈奎斯特频率的条件下获得不低于大  $F$  数低奈奎斯特频率的光学传递函数,可满足高分辨成像要求。

### 2.2 信噪比

光学系统的信噪比为:

$$SNR = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + D_e + N_R^2}}, \quad (3)$$

其中:  $S_e$  为信号电子数,  $D_e$  为暗信号电子数,  $N_R$  为噪声电子数。

信号电子数  $S_e$  如下:

$$S_e = \frac{\pi(1 - \epsilon) A_d t_{int}}{4F^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda L(\lambda) \eta(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

其中:  $\epsilon$  为光学系统的遮拦比,  $A_d$  为探测器面积,  $t_{int}$  为积分时间,  $h$  为普朗克系数,  $c$  为光速,  $L(\lambda)$  为光学系统入瞳处在波长  $\lambda$  处的光谱辐射亮度,  $\eta(\lambda)$  为探测器在波长  $\lambda$  处的量子效率,  $\tau_0(\lambda)$  为光学系统在波长  $\lambda$  处的光谱透过率。

从式(3)和式(4)可以看出, SNR 与  $\sqrt{A_d} / F$  成正比,与  $F$  数成反比,与探测器面积开根号成正比。优化光学系统参数可以确保小  $F$  数十微小像元与大  $F$  数十大像元的信噪比相当。

小  $F$  数十小像元技术体制的主要优点如下:

(1) 具有良好的成像质量,可确保高分辨成像的传递函数要求,同时保证信噪比;

(2) 具有更小的体积与质量,望远镜体积可减小 75%~83%,质量降低 83%~89%。

该体制的接收望远镜能够满足复杂应用场景的需求,实现便携式大量布置。

## 3 接收望远镜设计

### 3.1 总体设计

轻小型量子跟踪仪接收望远镜采用 RC 望远镜+小像元+量子模块的技术体制,量子密钥与信标接收共光路,主要实现“墨子号”850 nm 下行量子密钥和 532 nm 下行信标的接收。其总体技术指标如下:

- (1) 有效口径  $\geq 280$  mm;
- (2) 下行信标光: 532 nm;
- (3) 下行量子光: 850 nm;
- (4) 系统平均偏振对比度  $\geq 250:1$ ;
- (5) 系统量子接收效率  $\geq 50\%$ ;
- (6) 量子光接收视场  $\geq 150$   $\mu$ rad;
- (7) 工作环境温度:  $-40 \sim +60$   $^{\circ}\text{C}$ ;
- (8) 质量  $\leq 20$  kg。

望远镜一方面对 532 nm 下行信标近衍射极限成像,且对恒星成像时能够利用星图确定跟踪仪系统的指向模型;另一方面,要提供  $\varphi 4.5$  mm 平行光给量子接收单元。成像光路和量子接收

光路通过分光镜光谱分光,成像光路采用 F5 RC+补偿组光学结构,采用 5  $\mu\text{m}$  像元的面阵 CMOS,像元规模为 2 560 $\times$ 2 560 pixel。量子接收光路满足 BB84 协议高偏振对比度的接收。

接收望远镜的光机结构采用全铝材料一体化设计,提高其热稳定性及环境适应能力。光学反射镜材料选用荷兰 RSA-6061 微晶铝合金,光机结构选用硬铝合金,在保证光学结构刚度的前提下实现超轻量化设计。接收望远镜主要由防尘窗口、主镜组件、次镜组件、主支撑组件、量子接收组件和成像组件构成。优化设计后,轻小型量子跟踪仪接收望远镜的整机质量为 16 kg,体积为 435 mm $\times$ 390 mm $\times$ 415 mm,其总体构型如图 1 所示。

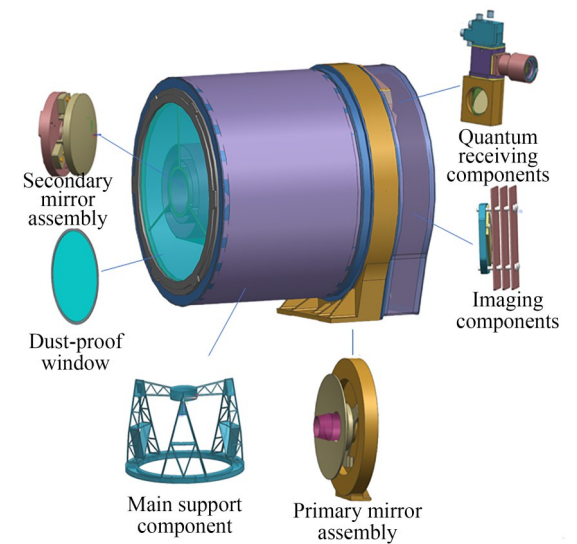


图 1 轻小型量子跟踪仪接收望远镜结构  
Fig. 1 Structure of lightweight and miniaturized quantum tracker receiving telescope

3.2 光学设计

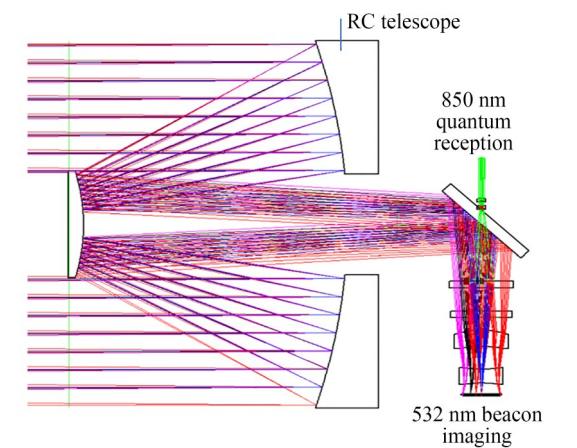
光学系统设计是在 RC 系统基本对称结构的基础上,采用非球面复杂化的结构形式来提升成像质量,尽量控制畸变。考虑到成像质量和量子接收效率的要求,结合 CMOS 感光面的尺寸,设计中适当提高光学系统焦距,提高成像分辨率。

采用同轴 RC+补偿组校正像差,配合 5  $\mu\text{m}$  小像元 CMOS 得到全视场内的完善像。通过优化设计匹配,光学系统的设计结果如表 1 和图 2 所示,可以看出,信标成像通道奈频处的平均光学传递函数为 0.481@100 pl/mm,全视场的最大

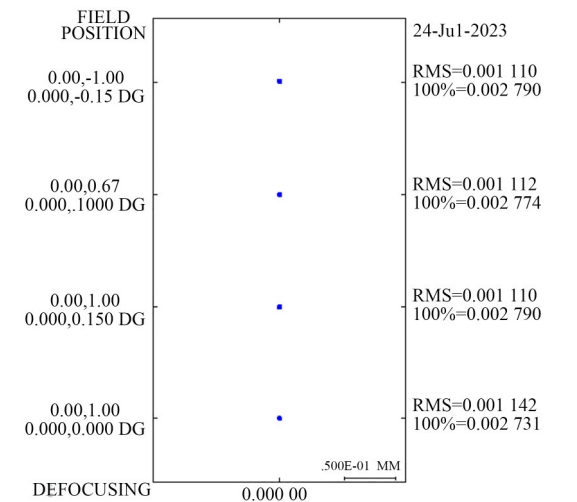
畸变优于 0.1%,焦距为 1 400 mm,信标成像视场  $\varphi$  为 0.3°,量子接收视场为 0.03°。量子接收通道缩束比为 62 倍,输出准直光束  $\varphi$  为 4.5 mm,发散角为 4.35 mrad。

表 1 轻小型量子跟踪仪接收望远镜的光学设计结果  
Tab. 1 Optical design result of lightweight and miniaturized quantum tracker receiving telescope

Index	Value
Band range/nm	850@Quantum reception
	532@Beacon reception
FOV/(°)	0.03@Quantum reception
	0.3@Beacon reception
f/mm	1 400
F#	5

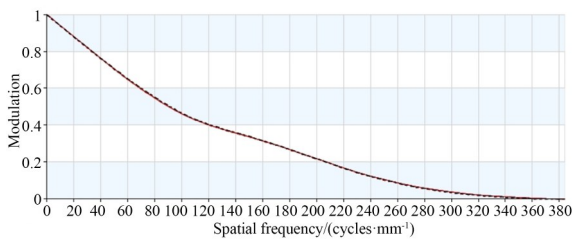


(a) 光学设计结果  
(a) Optical design results



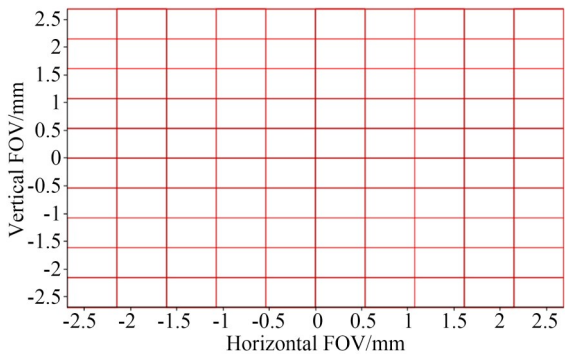
(b) 信标接收通道点列图  
(b) Spot diagram of beacon receiving channel





(c) 信标接收通道光学设计传函

(c) Optical transfer function of beacon receiving channel



(d) 信标接收通道光学畸变

(d) Optical distortion of beacon receiving channel

图 2 接收望远镜的光学设计结果

Fig. 2 Optical design results of receiving telescope

3.3 光机结构

轻小型量子跟踪仪接收望远镜的光机结构设计需要满足：

- (1)超轻量化,轻量化率达到 86%；
- (2)高刚度及高稳定性,基频不低于 60 Hz,确保量子跟踪仪整机具有较高的动态刚度,同时能够得到较高的控制精度；
- (3)宽域温度场下的高精度成像,采用光机结构一体化材料确保热光学稳定性好,主要是信标成像质量和量子接收两方面。

主镜口径  $\varphi 280\text{ mm}$ ,采用 RC+补偿组的结构形式。各反射镜及补偿组的光学稳定性满足光学公差要求,能够实现近衍射极限的高质量成像和高效率量子接收。

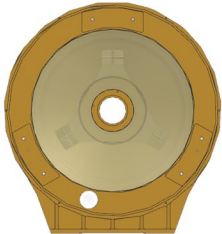
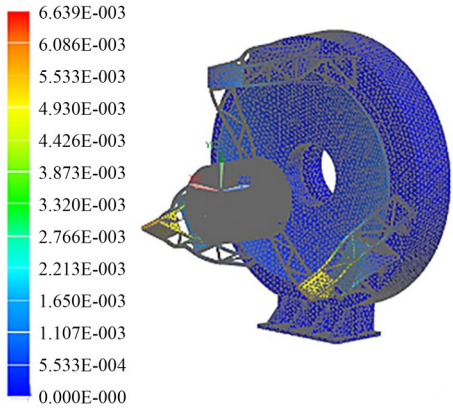


图 3 主镜组件结构

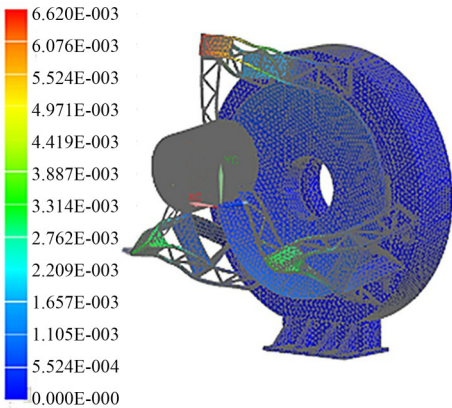
Fig. 3 Structure of primary mirror assembly

主、次反射镜材料采用高稳定性微晶铝合金、外廓轻量化的铝镜结构形式,高等刚度的结构设计优化铝镜背面外廓形状,提高其力学性能,保证不同重力条件下近衍射成像的面形精度,轻量化率可达到 86%。主镜和次镜均为圆形反射镜,采用背部三点柔性支撑方式,镜体与柔性支撑结构采用一体化结构,减小镜体加工残余应力对面形精度的影响。补偿组折射元件采用石英材料,使用硬铝合金柔性支撑补偿温度变化的影响<sup>[9]</sup>。

量子跟踪仪 ATP 采用地平式小型跟踪架,选择 T 型机架的结构形式布置,T 型机架一侧放置接收望远镜,另一侧放置上行信标激光器及配重。确定结构安装的边界条件对整机工程分析,确保望远镜应用场景下的高质量信标成像和高效率量子接收,主要从静力学(重力和温升)和动力学(模态)两方面详细分析,静力学和动力学分析结果如图 4 和图 5 所示。从表 2 中分析数据结



(a) X向重力面形  
(a) Gravity deformation in X direction



(b) Y向重力面形  
(b) Gravity deformation in Y direction

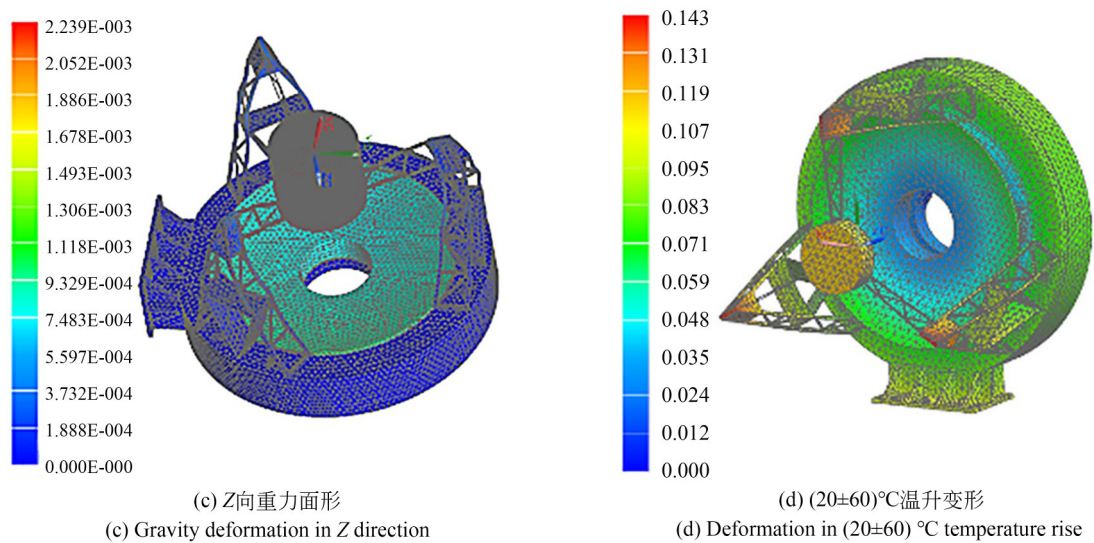


图 4 接收望远镜的静力学仿真分析结果

Fig. 4 Statics analysis results of receiving telescope

表 2 接收望远镜静力学和动力学分析结果

Tab. 2 Static and dynamics analysis results of receiving telescope

Mirror	Surface figure(RMS)/nm			Angular displacement/( $^{\circ}$ )			Temperature deformation/nm
	X	Y	Z	X	Y	Z	
Primary	8.521	8.521	2.578	0.325	0.325	0.139	9.870
Secondary	1.747	1.747	0.938	1.723	1.723	0.001	11.771

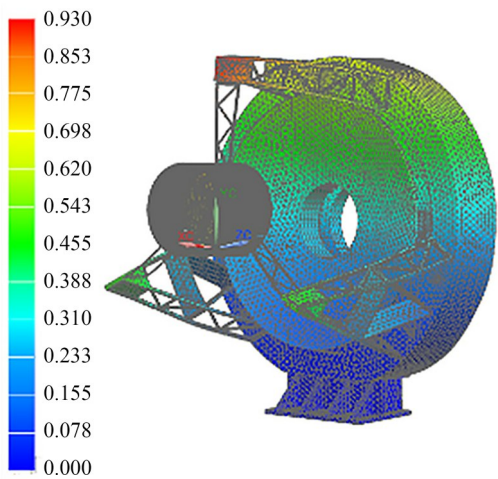


图 5 接收望远镜的一阶模态

Fig. 5 First mode of receiving telescope

果可得出,静力学仿真分析结果满足近衍射极限成像和高效率量子接收要求,一阶模态为 91 Hz,

动态刚度满足应用要求。

3.4 稳定性分析

量子跟踪仪接收望远镜做为野外使用的光学仪器,主要由信标成像接收和量子密钥接收两个光学通道组成,需要在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 严苛的环境条件下保持近衍射极限的成像和稳定高效的量子通信接收。在宽范围温度场影响下,用成像质量 MTF 评价信标成像接收,用光斑尺寸评价量子密钥接收,综合两方面来评价接收望远镜系统的温度稳定性<sup>[10]</sup>。

接收望远镜的稳定性分析主要从光学成像精度入手,系统光机结构的设计重点如下:

- (1)采用铝基光机结构一体化材料确保热光学稳定性好,具有良好的综合性能;
- (2)采用光学被动补偿的方式消热化设计,匹配材料和特殊光学元件之间的合理搭

配来消除温度的影响,保持系统光学性能不变;

(3)通过光学 MTF 和光斑尺寸来评价信标的成像质量和量子密钥的接收效果,保证量子跟踪仪接收望远镜在宽域温度场下( $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的系统探测能力。

在望远镜整机条件下对两个光学通道进行详细分析,光学设计软件中设置光学反射镜、主次反射镜间、次镜与补偿组间的材料,环境温度为 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。信标成像接收通道的光学传递函数如表 3 和图 6 所示,量子密钥接收通道的光斑尺寸如表 4 和图 7 所示。

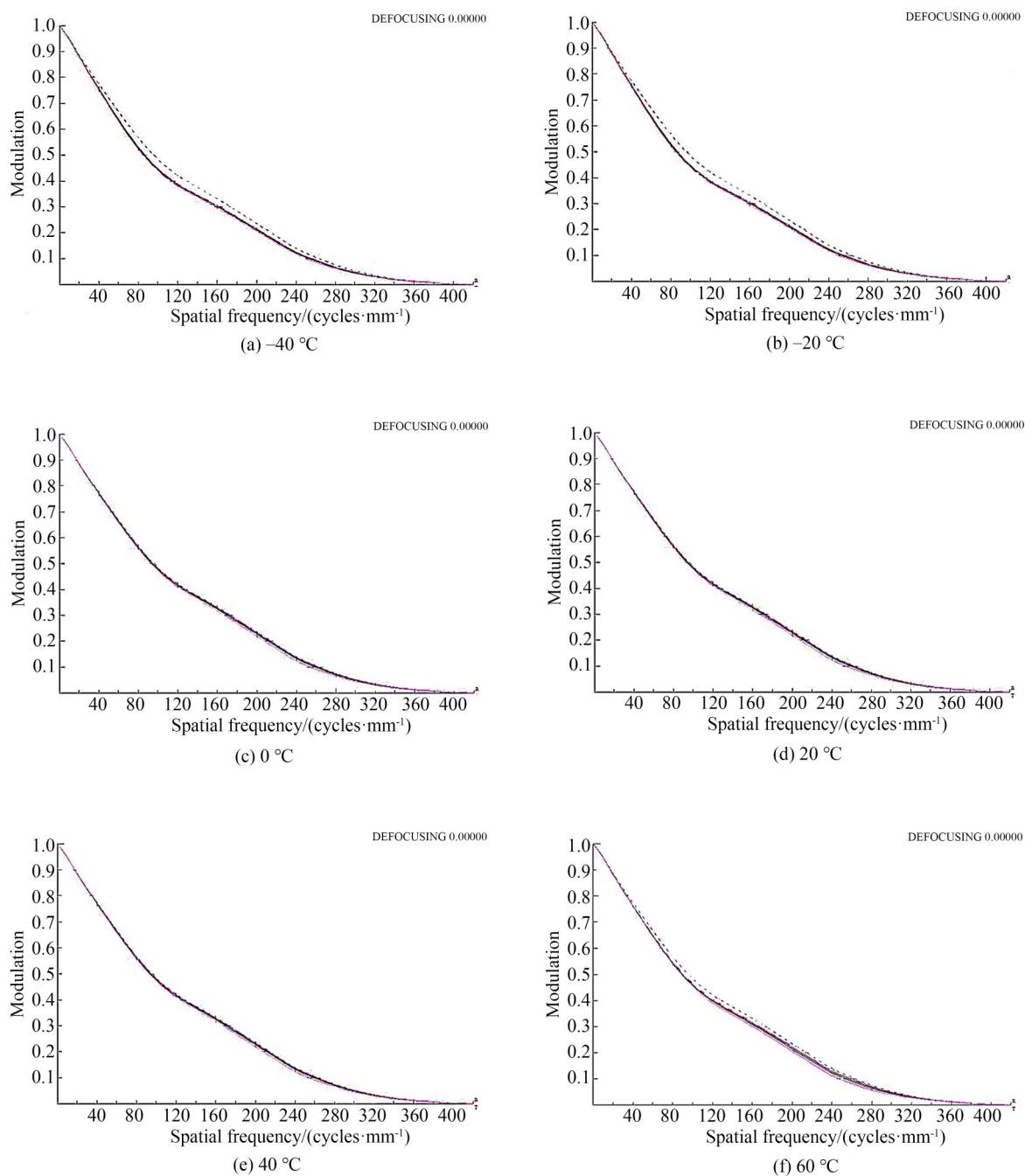


图 6  $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 信标接收通道的光学传递函数

Fig. 6 Optical transfer functions of beacon receiving channel from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

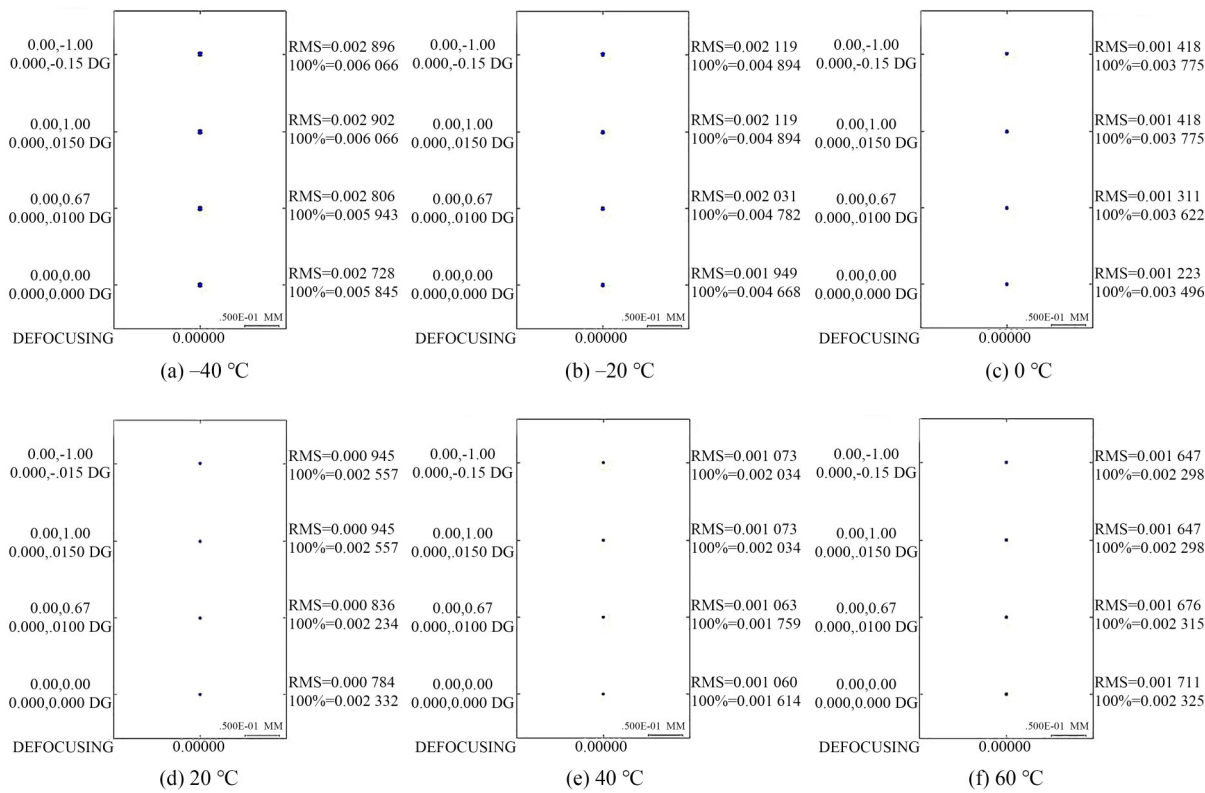


图7 -40 °C~+60 °C量子接收通道的光斑尺寸

Fig. 7 Spot size of quantum receiving channel from -40 °C to +60 °C

表 3 -40~+60 °C 信标接收通道的光学传递函数	
Tab. 3 Optical transfer function of beacon receiving channel from -40 °C to +60 °C	
Temperature/°C	OTF(@100 pL/mm)
-40	0.449
-20	0.469
0	0.481
20	0.481
40	0.477
60	0.461

表 4 -40~+60 °C 量子接收通道的光斑尺寸		
Tab. 4 Spot size of quantum receiving channel from -40 °C to +60 °C		
Temperature/°C	Spot size/μm	
	Diameter(RMS)	Diameter(100%)
-40	2.728	5.845
-20	1.948	4.667
0	1.222	3.495
20	0.784	2.331
40	1.059	1.614
60	1.711	2.325

4 集成测试

4.1 面形与传递函数测试

望远镜光学镜头信标成像通道的面形质量和光学传递函数<sup>[11]</sup>直接决定成像质量,使用ZYGO干涉仪测试镜头光学装调后中心视场和边缘视场的波像差。从测试结果可以看出,中心视场波像差RMS为λ/14.7,5个视场系统波像差均优于λ/12.7,可以确保近衍射极限的高

质量成像。望远镜5个视场的波像差(RMS)测试结果如表5所示,干涉检测结果如图8所示。

望远镜光学传递函数利用6 m焦距平行光管检测,对无穷远目标全色成像,成像结果和放大显示如图9所示。

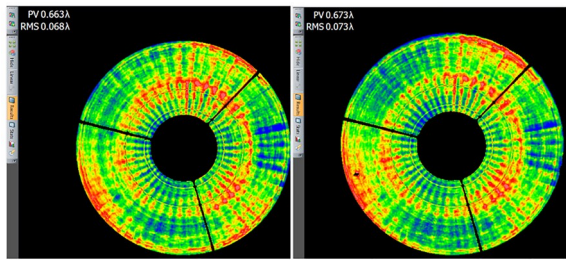
结合望远镜和平行光管实测焦距,经计算成像光路奈奎斯特频率对应国标3号分辨率板第



表 5 望远镜波像差测试结果(RMS)

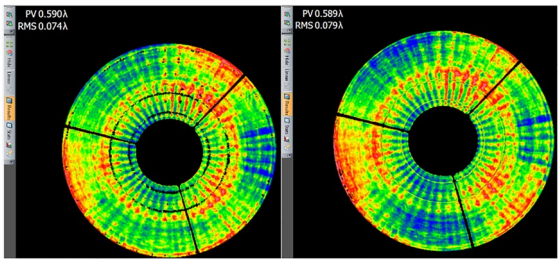
Tab. 5 Wavefront aberration results of telescope(RMS)

FOV	Wavefront aberration
Central	$\lambda/14.7$
Left	$\lambda/13.7$
Right	$\lambda/13.5$
Upper	$\lambda/12.7$
Middle and bottom	$\lambda/13.7$



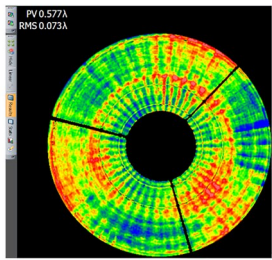
(a) 中心视场  
(a) Central FOV

(b) 左视场  
(b) Left FOV



(c) 右视场  
(c) Right FOV

(d) 上视场  
(d) Upper FOV



(e) 中下视场  
(e) Middle and bottom FOV

图 8 望远镜五个视场的干涉检测结果

Fig. 8 Interference detection results of five FOV of telescope

12组。根据光学传递函数<sup>[12]</sup>公式:

$$\text{MTF} = \frac{a - b}{a + b - 2c} \times \frac{\pi}{4}, \quad (5)$$

式中: $a, b$ 分别为相邻明暗条纹DN值, $c$ 为暗背景DN值。计算得到光电系统的传递函数为0.15。

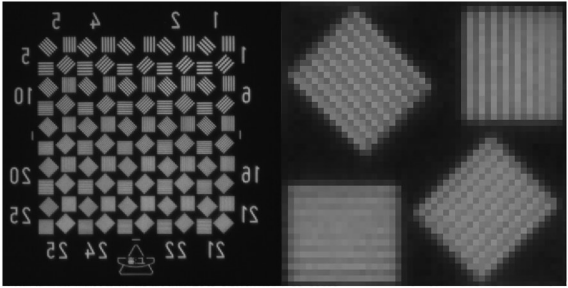


图 9 望远镜光学传函测试图像

Fig. 9 Optical transfer function testing image of the telescope

4.2 偏振对比度和效率测试

望远镜的偏振对比度<sup>[13]</sup>直接影响量子密钥分发实验的成码量和误码率,为此测试系统在BB84协议下H,V,+,−四个偏振态的偏振对比度。选取望远镜通光口径处5个测试点不同偏振态的偏振对比度如表6所示,从测试数据可得到系统HV+−的平均偏振对比度为454。

表 6 望远镜偏振对比度测试结果

Tab. 6 Polarization contrast test results of telescope

Measure point	H	V	+	−
1	321	393	684	448
2	654	1069	595	578
3	487	506	354	411
4	348	363	363	340
5	330	398	349	384
	398	370	471	294
Average	423	516	469	409

考虑到量子密钥的接收效率不低于50%,主要包括望远镜量子密钥光学通道(主次镜及准直镜组)、量子密钥接收模块和滤波片。其中,主次镜的入射功率为24.69 mW,准直镜的输出功率

表 7 望远镜偏振效率测试结果

Tab. 7 Polarization efficiency test results of telescope

H/ $\mu\text{W}$	V/ $\mu\text{W}$	+/ $\mu\text{W}$	−/ $\mu\text{W}$	Incident power/ $\mu\text{W}$	Result /%
468	90.13	167.5	485.6	1 650	73.40
481	93.90	165.7	486.2	1 650	74.35
477	91.00	171.4	482.8	1 650	74.07

为 18.85 mW,光学通道效率为 76.34%;滤波片效率为 92.00%;接收模块的效率测试结果如表 7 所示,3 次测试的平均值为 73.94%。

望远镜的全系统效率为:

$$\eta = 76.34\% \times 73.94\% \times 92\% = 51.93\%。(6)$$

### 4.3 跟星实验

这里通过望远镜外场跟星实验来验证对星成像及量子接收能力。受限於外场的实验环境条件,在  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  两个外场环境中,望远镜对五车二恒星成像,如图 10 所示。恒星图像占据  $2 \times 2$  像元,通过图像质心提取可计算脱靶量<sup>[14]</sup>,验证环境温度不影响接收望远镜的成像质量。

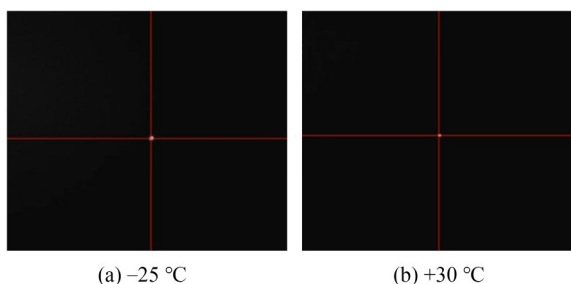
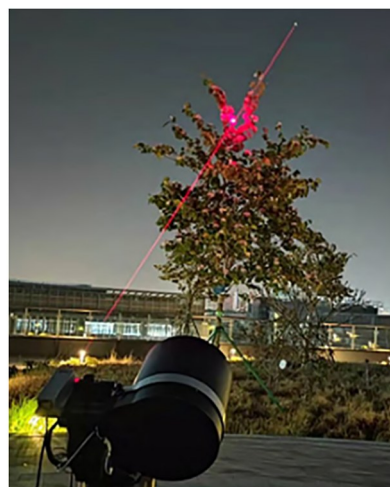


图 10 外场( $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )跟星成像效果

Fig. 10 Outfield tracking star at  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$

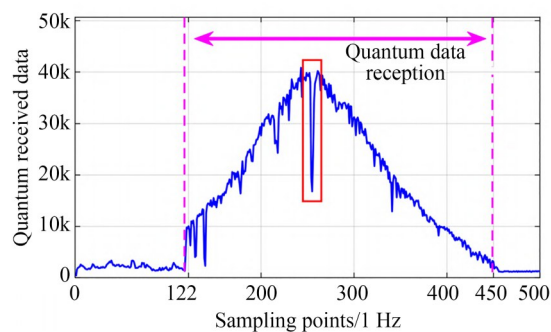
采用  $\phi 280$  量子跟踪仪接收望远镜与“墨子号”建立稳定的星地链路,如图 11 所示。量子跟踪仪与“墨子号”卫星建立稳定通信链路实验过程:首先由地面空间中心预约“墨子号”轨道,量子跟踪仪在约定时间加载轨道数据,并根据轨道数据引导方位轴和俯仰轴转动,“墨子号”向约定地点发射信标光,覆盖量子跟踪仪的地面范围。信标光出现在量子跟踪仪的视场内,即时切换到光闭环模式,进行光闭环跟踪,并达到跟踪精度,实现稳定跟踪后建立通信链路,“墨子号”下发量子光实现星地间稳定的量子通信链路。

通过密钥分发实验结果统计分析,接收望远镜对密钥接收成码为 92.9 kbit,误码率为 1.18%,能够满足高效率量子接收的应用需要。



(a) 与“墨子号”量子通信现场

(a) Quantum communication experiment site with “Mozi”



(b) 单轨量子数据的接收结果

(b) Reception results of single track quantum data

图 11 与“墨子号”量子密钥分发实验

Fig. 11 QKD experiment with “Mozi”

## 5 结 论

本文根据未来量子保密通信网络建设对于轻小型量子跟踪仪接收望远镜的需求,提出了接收望远镜采用小  $F$  数+微小像元的总体技术体制和 RC+CMOS+量子模块的光学系统形式,详细设计了全铝一体化结构的  $\phi 280$  量子跟踪仪接收望远镜,并详细分析了系统的温度稳定性。最后,对轻小型量子跟踪仪接收望远镜进行了集成测试,主要包括面形与传递函数测试、偏振对比度、效率测试和跟星实验。测试和实验结果表明:整机质量为 16 kg,一阶模态为 91 Hz,整机结构刚度足够大;望远镜中心视场波像差 RMS 为  $\lambda/14.7$ ,5 个视场的波像差 RMS 均优于  $\lambda/12.7$ ,

可以确保信标通道接近衍射极限的高质量成像;实测光学传递函数为 0.15;与“墨子号”顺利完成星地量子密钥分发实验,误码率为 1.18%,

成码量为 92.9 kbit。 $\Phi 280$  接收望远镜为轻小型量子跟踪仪的设计提供了理论指导和工程借鉴。

#### 参考文献:

- [1] YANG K X, ABULIZI M, LI Y H, *et al.* Single-mode fiber coupling with a M-SPGD algorithm for long-range quantum communications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36600-36610.
- [2] CAO Y, LI Y H, YANG K X, *et al.* Long-distance free-space measurement-device-independent quantum key distribution[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 260503.
- [3] SANTANA-ROS T, MICHELI M, FAGGIOLI L, *et al.* Orbital stability analysis and photometric characterization of the second Earth Trojan asteroid 2020 XL5 [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 447.
- [4] NAUERTH S, MOLL F, RAU M, *et al.* Air to ground quantum key distribution[J]. *Quantum Communications and Quantum Imaging X*, 2012, 8518: 85180D.
- [5] MOLL F, NAUERTH S, FUCHS C, *et al.* Communication system technology for demonstration of BB84 quantum key distribution in optical aircraft downlinks[C]. *SPIE Proceedings, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans*. San Diego, California, USA. SPIE, 2012.
- [6] YIN J, REN J G, LU H, *et al.* Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. *Nature*, 2012, 488 (7410): 185-188.
- [7] 费强, 邓永停, 王雪峰, 等. 星地量子跟踪仪的跟踪控制系统[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24): 3178-3188.  
FEI Q, DENG Y T, WANG X F, *et al.* Tracking and aiming control system for satellite earth quantum tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(24): 3178-3188. (in Chinese)
- [8] 金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 155-159.
- [9] JIN G, ZHANG L, HU F SH. Investigation on space optical system of high F number and high resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
- [9] 张刘, 郑潇逸, 张帆, 等. 大容差多柔性透镜组结构优化设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(2): 478-485.  
ZHANG L, ZHENG X Y, ZHANG F, *et al.* Structural optimization design of large tolerance multi-flexible lens group [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(2): 478-485. (in Chinese)
- [10] 梁瑞虹, 赵盖, 陈宁, 等. 超声电机宽温域低损耗压电与摩擦功能材料[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 771-781.  
LIANG R H, ZHAO G, CHEN N, *et al.* Wide-temperature-range and low-loss piezoelectric and friction functional materials of ultrasonic motor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 771-781. (in Chinese)
- [11] 李寒霜, 李博, 李昊晨, 等. 基于一种透镜材料的宽谱段紫外成像仪光学设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(1): 65-71.  
LI H SH, LI B, LI H CH, *et al.* Optical design of a wide-spectrum ultraviolet imager based on a single material[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2022, 15(1): 65-71. (in Chinese)
- [12] 李文雄, 申军立, 张星祥, 等. 低温红外离轴三反准直系统设计[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1285-1294.  
LI W X, SHEN J L, ZHANG X X, *et al.* Design of low temperature infrared off-axis three-mirror collimation system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(9): 1285-1294. (in Chinese)
- [13] 赵永强, 张景程, 乔新博. 基于偏振权重局部对比度的目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2023, 42(1): 102-110.

ZHAO Y Q, ZHANG J CH, QIAO X B. Object detection based on polarization-weighted local contrast method[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2023, 42(1):102-110. (in Chinese)

- [14] 柳鸣, 杨文波, 刘德龙, 等. 基于星图匹配脱靶量标定的移动测站望远镜指向修正技术[J]. 红外与

激光工程, 2023, 52(5): 3788/IRLA20220813.

LIU M, YANG W B, LIU D L, *et al.* Pointing correction technology of telescope of mobile tracking station based on star pattern matching deviation calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 3788/IRLA20220813. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙景旭(1984—),男,山东聊城人,博士,副研究员,2008年于吉林大学获得学士学位,2011年于中国科学院研究生院获得硕士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光学仪器总体技术和光机结构方面的研究。E-mail: sunjingxu2004@163.com



费强(1993—),男,山东日照人,博士,2020年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事量子通信系统、高精度伺服系统、空间遥感精密运动控制等方面的研究。E-mail: feiq@jihualab.ac.cn